

В. В. ФУРДУЕВ

СТЕРЕОФОНИЯ И МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЗВУКОВЫЕ СИСТЕМЫ

МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 837

В. В. ФУРДУЕВ

СТЕРЕОФОНИЯ И МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЗВУКОВЫЕ СИСТЕМЫ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1973

6Ф2.7
Ф95

УДК 681.84.087.7

Фурдуев В. В.
Ф 95 Стереофония и многоканальные звуковые системы. М., «Энергия», 1973.

112 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 837).

В книге рассматриваются многоканальные акустические тракты, предназначенные для передачи натуральных звучаний — музыки, речи, шумов. Описаны многоканальные системы, используемые для восстановления или для электрического моделирования звуковых полей, для коррекции акустических дефектов закрытых помещений и для звукотехнического оснащения больших залов. Устанавливается возможность количественной оценки разнообразия приемов обработки звукового материала в зависимости от структуры многоканальной системы на ее входной или выходной стороне.

Книга рассчитана на специалистов и подготовленных радиолюбителей интересующихся успехами современной техники высококачественной передачи звука.

Ф $\frac{0345\text{-}517}{051(01)\text{-}73}$ 273-73

ОБ АВТОРЕ

Предлагаемая вниманию читателей книга «Стереофония и многоканальные звуковые системы» — заключительный аккорд творчества одного из крупнейших советских ученых-акустиков, доктора технических наук, профессора Вадима Владимировича Фурдуева, имя которого известно всем, кто так или иначе сталкивался с акустикой слышимого диапазона частот.

Более 40 лет жизни отдал В. В. Фурдуев развитию современной акустики. Он выполнил фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования, позволившие создать современную электроакустическую технику — громкоговорители, микрофоны, ревербераторы, различное акустическое и звукотехническое оборудование. В. В. Фурдуев создал курс технической электроакустики и много лет читал его в Московском ордена Трудового Красного Знамени электротехническом институте связи. Он организовал и ряд лет возглавлял лабораторию акустики и звукоусиления в Научно-исследовательском институте строительной физики. Он воспитал не одно поколение научных работников и инженеров. В 1949 г. за участие в создании новой усовершенствованной кинотеатральной аппаратуры В. В. Фурдуев был удостоен Государственной, а в 1962 г. — за участие в создании звукотехнического оборудования Кремлевского Дворца съездов — Ленинской премий.

Последние годы жизни Вадим Владимирович работал во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте над проблемами сложных многоканальных систем передачи звука, исследовал основополагающие психофизические и технические принципы стереофонии. По существу он впервые сформулировал основные понятия и построил основы теории многоканальных и стереофонических систем.

Итогом этого цикла работ, частично опубликованного прежде в научной периодике, явилась настоящая книга, над которой Вадим Владимирович трудился до последних дней своей жизни и последние страницы которой были дописаны им совсем незадолго до смерти.

Книга эта — достойный памятник большому ученому и блестящему педагогу, созданный им самим.

Всесоюзный научно-исследовательский кинофотоинститут. Изд-во «Энергия»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное развитие электроакустической техники позволяет предъявлять все более строгие требования к техническому и художественному качеству передачи натуральных звучаний, в первую очередь музыки. Возможности одноканальной (монофонической) передачи теперь приходится признать уже исчерпанными; дальнейшее совершенствование требует увеличения числа каналов. Двухканальная стереофония прочно завоевала позиции в технологии механической и магнитной звукозаписи; стереофонические передачи регулярно, хотя и в небольшом объеме, стали включаться в программы музыкального радиовещания. На повестку дня поставлен вопрос о технических возможностях перехода к квадрафонии, требующей наличия четырех каналов. Многоканальные системы различной степени сложности используются в новых видах кинематографа и успешно применяются для звукотехнического оборудования крупных залов универсального назначения, для коррекции архитектурно-акустических дефектсв, а также для электроакустического моделирования условий восприятия в концертных залах.

Необходимость звукорежиссуры, т. е. предварительной обработки первичного звукового материала, привела к тому, что те системы электроакустической передачи, выходные сигналы которых подлежат эстетической оценке, закономерно сделались системами с недетерминированным выходом. Для правильного понимания открываемых ими возможностей необходим критический пересмотр смысла и содержания понятия «высокой верности» звуковоспроизведения. Возникающие в связи с этим вопросы представляют интерес не только с инженерно-технической точки зрения; в некоторых своих аспектах они близко касаются психологии слухового восприятия и эстетической оценки звуковой информации. В частности, это относится к вопросу о природе стереофонического эффекта и о количественной мере диапазона возможностей звукорежиссуры.

Предлагаемая книга имеет целью дать достаточно подробное представление о новых идеях, задачах и технических решениях, относящихся к многоканальной передаче вообще и в особенности к стереофонии в различных формах ее использования. Книга рассчитана на читателей, знакомых с современной техникой записи, передачи и воспроизведения звука настолько, чтобы не нуждаться в популярном изложении ее основ. Вместе с тем

автор пользовался математическими средствами лишь в очень небольшом объеме, как правило, не выходя за рамки более или менее элементарных приемов. Исключением является лишь § 1, содержащий краткие сведения о статистических характеристиках сигналов, представляющих натуральные звучания. При первом чтении этот параграф можно пропустить, обращаясь к нему позднее в случае, когда это понадобится для уточнения смысла некоторых терминов.

Стереофония, как практически уже освоенная область электроакустической техники, существует не менее полутора десятков лет. Ей посвящены книги и множество журнальных статей. Предлагаемая книга не ограничивается систематизацией литературных материалов, хотя и сравнительно новых. Ее содержание отображает направления и результаты исследований, проводившихся в течение последних лет научным коллективом, в составе которого работал автор.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СИГНАЛЫ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЕ НАТУРАЛЬНЫЕ ЗВУЧАНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ[1]

Электроакустические системы, которым посвящена эта книга, предназначаются для передачи сигналов, представляющих натуральные звучания — речь, музыку, шумы. Под термином сигнал мы подразумеваем прежде всего тот или иной физический процесс, развертывающийся во времени, если он служит средством передачи какой-либо информации ее материальным носителем. В частности, сигналом может быть избыточное давление в звуковом поле, переменные ток или напряжение в электрической цепи и т. п. Сигналом называется также и запись информации, сделанная, например, на светочувствительном или на ферромагнитном слое, нанесенном на движущуюся ленту. Такое расширение понятия сигнала оправдано возможностью воспроизведения сделанной записи, при этом снова возникает законсервированный в ней процесс подобно тому, как при произнесении написанного текста возникает речевой сигнал — переменное во времени звуковое давление.

Требования, предъявляемые к системам передачи, определяются в первую очередь свойствами и характеристиками передаваемых сигналов. Говоря о натуральных звучаниях, нужно иметь в виду, что соответствующие сигналы представляют собой случайные процессы весьма не регулярной формы. Если не прибегать к более точным математическим формулировкам, это означает, что связь последующего хода случайного процесса с предшествующим его протеканием является чисто статистической; прогноз «будущего» на основе знания «прошедшего» не только имеет здесь вероятностный смысл, но и ограничен очень небольшими отрезками ближайшего будущего. Таким образом, интересующие нас свойства сигналов определяются их статистическими характеристиками — распределениями случайных величин, связанных с динамикой и частотным составом сигналов, и с некоторыми средними параметрами, полученными из этих распределений.

В качестве примера на рис. 1 изображено распределение мгновенных значений речевого сигнала $x(t)$. Диаграмма построена в безразмерных ко-

---

[1] Приводимые в этом разделе характеристики сигналов заимствованы из статьи Л. В. Шитова и Б. Г. Белкина [Л. 18], выводы которой основаны иа исследовании нескольких десятков образцов разнообразных звучаний.

ординатах: значения x выражены через среднеквадратическое отклонение σ, а плотность вероятности $p(x)$ умножена на σ. Представленное в таком виде распределение нормировано и не зависит от уровня сигнала. Пунктирная линия изображает (в тех же координатах) нормальное распределение. Распределение речевого сигнала имеет значительно более заостренную вершину при $x=0$. Это свойство характерно не только для речи, но в большей или меньшей степени и для сигналов, представляющих музыкальные звучания; не приводя соответствующих распределений, отметим, что все они «острее» нормального.

Принятая в теории вероятностей мера островершинности кривой распределения носит название эксцесса и выражается через центральные моменты второго и четвертого порядков. Эксцесс нормального распределения равен нулю; распределения, более заостренные, чем нормальные, имеют положительный эксцесс, а менее заостренные — отрицательный. Исследование большого числа сигналов, представляющих речь и различные виды музыки, показало, что наиболее высокие эксцессы (от 3,5 до 6,5) характерны для речи, тогда как эксцесс музыкальных звучаний лишь в редких случаях превышает 4,0.

Нетрудно заметить, что эксцесс распределения мгновенных значений сигнальной функции позволяет судить о некоторых свойствах сигнала, представляющих очевидный интерес. Ясно, например, что сигнал с частыми, хотя бы и очень короткими паузами (примером может служить речь), должен иметь повышенную плотность вероятности в области близких к нулю значений и, следовательно, высокий эксцесс. Далее, у сигналов с островершинным распределением обычно отмечается повышенная вероятность больших выбросов (пиков). Это подтверждается диаграммой на рис. 2, свидетельствующей о наличии достаточно сильной статистической связи (коэффициент корреляции 0,8) между эксцессом γ распределения мгновенных значений и так называемым пик-фактором:

$$П=x_{\text{макс}}/\sigma,$$

где $x_{\text{макс}}$ — максимальное значение (не превышаемое с вероятностью, близкой к единице, например, 0,999) сигнальной функции.

Прямая линейной регрессии на рис. 2 определяет математическое ожидание пик-фактора сигнала в зависимости от эксцесса.

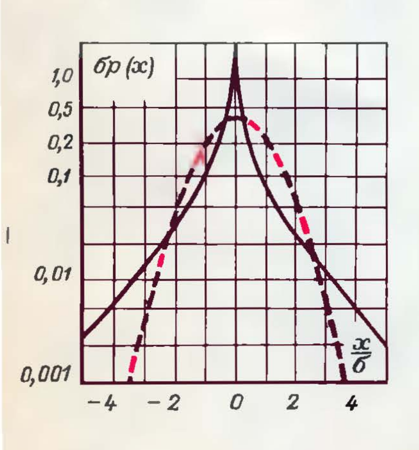


Рис. 1.

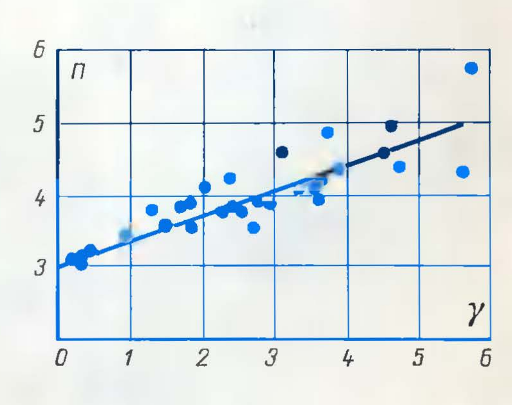


Рис. 2.

Текущая мощность сигнала является случайной функцией времени, медленно меняющейся по сравнению с самой сигнальной функцией. Смысл этого понятия лучше всего поясняется способом наблюдения и измерения соответствующей величины. Исследуемый сигнал $x(t)$ подается на вход квадратора; получаемое на его выходной стороне напряжение $x^2(t)$ поступает на интегрирующую RC-цепочку. Напряжение $P(t)$, снимаемое с конденсатора C, представляет результат текущего усреднения квадрата сигнальной функции; усреднение выполняется с весовой функцией

$$\varphi(\theta)=\frac{1}{T}e^{-(t-\theta)/T}, \qquad (1)$$

где постоянная $T=RC$ характеризует память интегратора, а моменты θ относятся к прошедшему времени ($\theta\leq t$).

Образно выражаясь, весовая функция отображает постепенное «забывание» прошлых значений сигнала, тем менее влияющих на текущий результат усреднения, чем дальше они отодвигаются в область прошлого. Математически текущая мощность выражается (с точностью до множителя пропорциональности) формулой

$$P(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t}e^{-(t-\theta)/T}x^2(\theta)d\theta. \qquad (2)$$

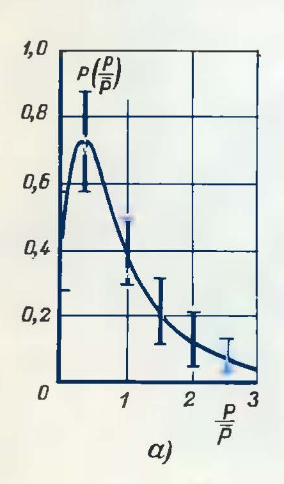
Постоянная времени T определяется периодом колебания на нижней границе спектра исследуемых сигналов; проводимые далее данные получены при $T=30$ мс.

На рис. 3 представлены распределения текущей мощности, усредненные по пяти образцам речи (*а*) и по 30 образцам музыкальных звучаний (*б*). Мощность P выражена здесь через долговременное среднее значение $\overline{P}$; отрезки вертикальных прямых показывают разброс усредняемых величин. Интересно отметить, что для музыки, как и для речи, мода распределения, т. е. значение P, имеющее наибольшую вероятность, лежит ниже долговременного среднего $\overline{P}$.

Насколько различными могут быть характеристики динамики натуральных звучаний, даже относящихся к одному и тому же типу, можно судить по интегральным распределениям динамических уровней (рис. 4). Динамическим (переменным во времени) уровнем сигнала принято называть уровень его текущей мощности:

$$N(t)=10\lg\frac{P(t)}{P_0}.$$

На графиках (рис. 4) по оси абсцисс отложены уровни N, измеренные относительно максимального, соответствующего такой мощности $P_0=P_{\text{макс}}$, которая не превышается с вероятностью, очень близкой к единице. Орди-



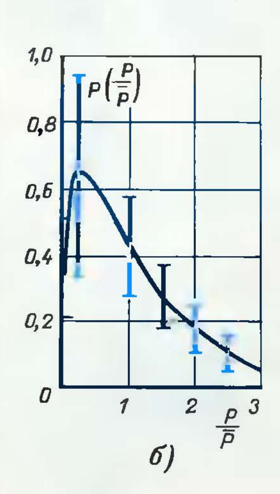


Рис. 3.

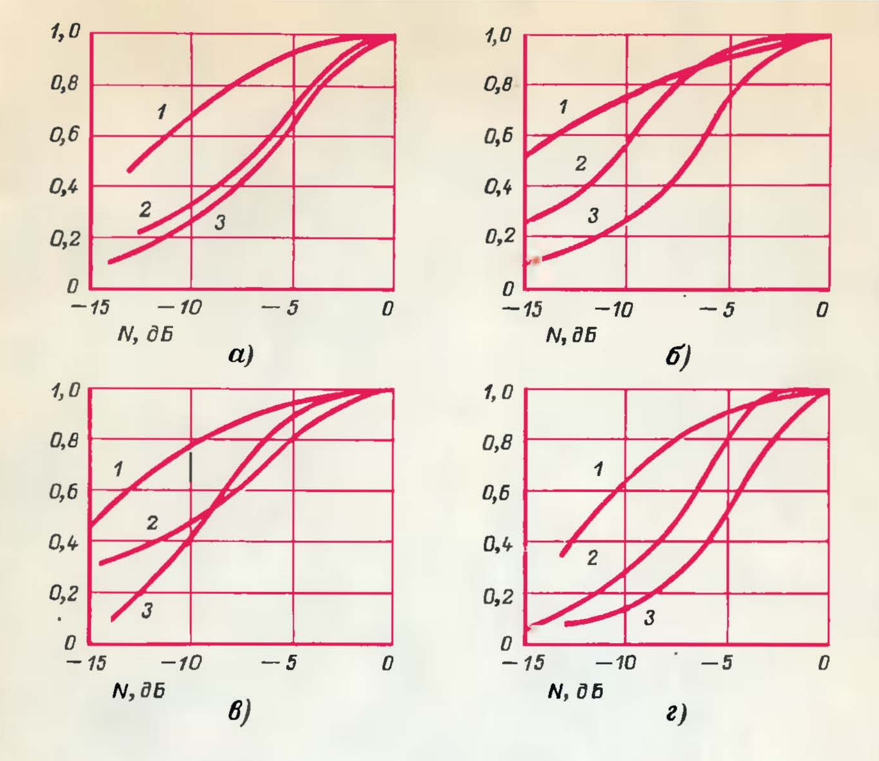


Рис. 4

наты кривых определяют вероятность непревышения того или иного значения N или ту долю времени звучания, в которой уровень N не превышается.

Распределения, изображенные на диаграмме (рис. 4, *а*), относятся к речевым сигналам: художественному чтению (кривая *1* — мужской голос, кривая *2* — женский) и к дикторскому тексту, прочитанному мужским голосом (кривая *3*). Кривые на диаграмме (рис. 4, *б*) характеризуют камерную музыку: вокальную *1*, произведение для струнного квинтета *2* и фортепьянную *3*. Несколько примеров музыки, исполненной симфоническим оркестром обычного состава, представлены кривыми на диаграмме (рис. 4, *в*). Наконец, кривые на диаграмме (рис. 4, *г*) представляют большой симфонический оркестр *1*, духовой *2* и эстрадно-джазовый *3* оркестры.

Переходя к спектральным характеристикам натуральных звучаний, напомним, что используемое здесь понятие спектра имеет статистический смысл, достаточно далекий от классического определения спектра через преобразование Фурье. Спектральные свойства музыки и речи исследуются с помощью набора полосовых фильтров, каждый из которых пропускает ограниченную часть звукового диапазона от некоторой нижней частоты f_1 до верхней f_2, например октаву ($f_2/f_1=2$) или треть октавы ($f_2/f_1=\sqrt[3]{2}=1{,}26$). В каждой из полос, совокупность которых охватывает весь исследуемый диапазон частот, можно измерять статистические характеристики, как распределение мгновенных значений сигнала, текущей мощности или ее уровней и т. п. Параметры, получаемые из этих распределений, например

максимальная и средняя мощность, спектральная плотность мощности или уровня, представленные (обычно в графической форме) в зависимости от средней частоты полосы, называем спектральными характеристиками или спектрами сигнала.

На рис. 5, *а—г* изображены спектры уровней максимальной и средней мощности, характеризующие различные виды натуральных звучаний: речь, камерную, эстрадную и симфоническую музыку. Сплошные кривые на каждом из графиков относятся к спектральным уровням максимальной мощности при трех ее определениях, соответствующих различным значениям малой вероятности превышения (1%, 0,5%; 0,1%); пунктирная кривая изображает спектр уровней средней мощности. Измерения делались в октавных полосах, средние частоты которых ($\sqrt{f_1 f_2}$) отложены по оси абсцисс.

Как показали измерения, самые высокие уровни почти всегда отмечаются в октавной полосе со средней частотой 500 Гц; исключением является эстрадная музыка, где несколько более нагруженной оказалась октава со средней частотой 1 000 Гц. В области наибольших нагрузок спектральные уровни могут достигать значений, лежащих на 2—2,5 дБ ниже максимальной мощности в широкой полосе частот (0 дБ на спектрах рис. 5). Разность уровней максимальной и средней мощности составляет 4—5 дБ, однако в спектре речевого сигнала эта разность возрастает в сторону высоких частот (выше 1 000 Гц), доходя до 10 дБ и более.

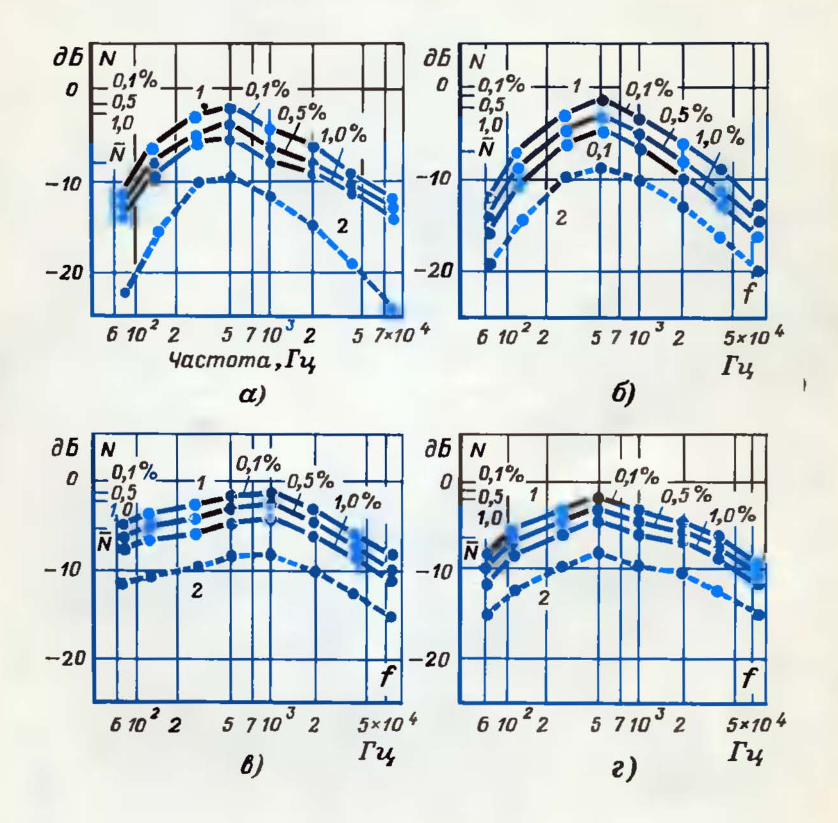


Рис. 5.

Наряду с динамическими и спектральными характеристиками сигналов немалый интерес представляют корреляционные функции, отображающие статистическую связь между двумя сигналами, в той или иной мере зависимыми друг от друга (взаимная корреляция), или между сигналом и его запаздывающим повторением (автокорреляция). Корреляционные функции позволяют судить об уровне интерференционных эффектов при сложении сигналов, т. е., другими словами, о степени когерентности слагаемых.

Рассмотрим сигнал, полученный путем сложения двух сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t-\tau)$, где τ — временной сдвиг, который, в частности, может быть равен нулю. Средняя мощность $\overline{P}$ суммарного сигнала определяется средним по времени значением квадрата суммы:

$$\overline{P} = \overline{[x_1(t) + x_2(t-\tau)]^2} = \overline{x_1^2} + 2\overline{x_1 x_2} + \overline{x_2^2} = \overline{P}_1 + \overline{P}_2 + 2r_{12}(\tau)$$

(как и раньше, опускаем множитель пропорциональности; черта сверху означает усреднение по времени). Этот результат показывает, что мощность $\overline{P}$ суммы сигналов в общем случае отличается от суммы их мощностей $\overline{P}_1+\overline{P}_2$ на удвоенную величину:

$$r_{12}(\tau) = \overline{x_1(t)x_2(t-\tau)},$$

зависящую от временного сдвига между сигналами и представляющую среднее значение их произведения. Функция $r_{12}(\tau)$ характеризует взаимную корреляцию сигналов. Если при усреднении мгновенные значения x_1 и x_2 одинаково часто перемножаются с совпадающими и с противоположными знаками (т. е. если оба случая равновероятны), то $r_{12}(\tau)$ близка к нулю. При этом $\overline{P}=\overline{P}_1+\overline{P}_2$ и сигналы, будучи некогерентными, складываются, как принято говорить, энергетически. При $r_{12}>0$ когерентные сигналы, интерферируя, взаимно усиливаются и $\overline{P}>\overline{P}_1+\overline{P}_2$; напротив, если $r_{12}<0$, интерференция приводит к взаимному ослаблению сигналов и $\overline{P}<\overline{P}_1+\overline{P}_2$.

В применении к музыке и речи особый интерес представляет автокорреляция, характеризующая связь между прошлыми и будущими значениями сигнала. Вместе с тем нужно иметь в виду, что эти сигналы не являются статистически однородными: их автокорреляционные характеристики, как и текущая мощность, изменяются, хотя и сравнительно медленно, будучи случайными функциями времени. Как и при измерении мощности, текущее усреднение произведения мгновенных значений $x(t)$ и $x(t-\tau)$ должно выполняться с весовой функцией (1), экспоненциально убывающей в сторону прошедшего времени. Функция текущей автокорреляции определяется выражением

$$r(t,\tau) = \frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-(t-\theta)/T} x(\theta)x(\theta-\tau)d\theta. \tag{3}$$

Сравнение с формулой (2) показывает, что при $\tau=0$ функция $r(t, 0)$ совпадает с текущей мощностью $P(t)$ сигнала $x(t)$.

Усредняя случайную функцию $r(t, \tau)$ по времени, получаем величину, зависящую только от τ; выбрав в качестве ее меры среднюю мощность $\overline{P}$, можно определить безразмерный коэффициент:

$$\rho(\tau) = \frac{\overline{r(t,\tau)}}{\overline{r(t,0)}} = \frac{\overline{r(t,\tau)}}{\overline{P}}, \tag{4}$$

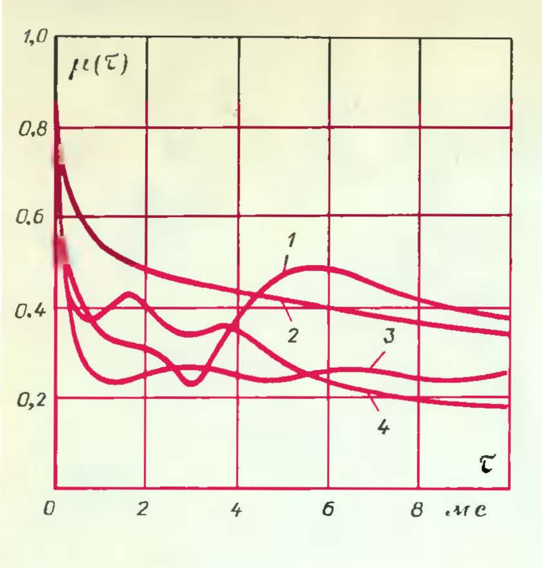


Рис. 6.

представляющий нормированную автокорреляцию. Этот коэффициент заключен в интервале $-1 \leqslant \rho \leqslant +1$.

Обычно в тех случаях, когда результат интерференции случайным образом изменяется во времени, т. е. когда складывающиеся сигналы попеременно то усиливают, то ослабляют друг друга, энергетическая оценка интерференционных эффектов не представляет особого интереса. Гораздо интереснее знать, насколько сигналы вообще способны интерферировать при заданном сдвиге τ безотносительно к тому, будет ли текущая автокорреляция чаще положительной, чем отрицательной, или наоборот. В подобных случаях удобнее пользоваться нормированным среднеквадратическим значением случайной функции $r(t, \tau)$:

$$\mu(\tau) = \left\{ \frac{\overline{[r(t,\tau)]^2}}{\overline{[r(t,0)]^2}} \right\}^{1/2} \qquad (5)$$

Эту величину, заключенную в интервале $0 \leqslant \mu \leqslant 1$, условимся называть коэффициентом когерентности [Л. 14]. В применении к статистически стационарным сигналам коэффициентом когерентности принято называть нормированную функцию автокорреляции (4).

Некоторые типичные примеры, иллюстрирующие утрату когерентности по мере увеличения запаздывания τ, представлены на рис. 6. Кривая *1* представляет фортепьянную музыку (Шопен, Вальс № 7), кривая *2* — орган (Бах, токката и фуга), кривая *3* — большой симфонический оркестр (Бетховен, симфония № 7, часть четвертая). Последним примером (кривая *4*) является первый концерт Рахманинова для фортепьяно с оркестром.

Видим, что в области малых запаздываний ($\tau < 2$ мс) $\mu(\tau)$ снижается очень быстро; органная музыка является однако исключением. При дальнейшем возрастании временного сдвига коэффициент когерентности убывает гораздо медленнее.

При $\tau > 10$ мс сигналы уже можно считать практически некогерентными. Они складываются почти энергетически; их корреляционная связь ($\mu = 0{,}2 \div 0{,}25$) не сильнее той, которая обнаруживается даже и у сигналов, представляющих два разных музыкальных произведения одного и того же вида. Наличию такой связи не надо удивляться: ведь все музыкальные звучания строятся из некоторых простейших элементов, принадлежащих конечному множеству подобно тому, как речевые сигналы являются последовательностями фонем, общее число которых не превышает сотни.

2. РАЗЛИЧИМОСТЬ, ИЗОМОРФИЗМ, КОГЕРЕНТНОСТЬ

Помимо статистических характеристик, отображающих объективные свойства сигналов, очень важное значение имеют факторы и закономерности, относящиеся к слуховому восприятию электроакустически передаваемых натуральных звучаний. Современная техника магнитной звукозаписи, давшая удобную возможность многократно предъявлять слушателям звучание с неизмененными характеристиками, допускающая быструю смену отрывков сигналов, сравниваемых по какому-либо признаку, позволяющая вводить желаемые задержки сигналов и т. д., обеспечила высокую степень гибкости и оперативности в проведении прослушиваний, необходимых для экспериментального исследования разнообразных психоакустических явлений, с которыми встречаемся в технике звукопередачи.

Как будет видно из последующего, в процессе подготовки к электроакустической передаче сигналы, представляющие натуральные звучания, должны подвергаться обработке, во многих случаях изменяющей их объективные характеристики. Кроме того, свойства сигналов могут изменяться в результате искажений, вносимых отдельными звеньями системы передачи. В обоих случаях нужно заранее знать, насколько заметным окажется преобразование формы сигнала, обусловленное сознательным или непреднамеренным изменением характеристик. Поэтому одной из важных задач психоакустики является исследование различимости электроакустически воспроизводимых сигналов, объективно различающихся по тем или иным условиям их передачи.

Два сигнала, имеющиеся в нашем распоряжении в виде высококачественных записей, назовем совпадающими по форме или изоморфными, если при их равногромком воспроизведении в некоторых стандартизированных условиях они оказываются неразличными при поочередном предъявлении группе слушателей.

Очевидно, что практический интерес представляет исследование лишь таких сигналов, между которыми существует не только различие, но и сходство, позволяющее говорить о двух в той или иной мере различимых вариантах одного и того же звучания. Имеет смысл, например, сравнивать искаженное и неискаженное звучание некоторого сигнала; можно сравнить сигналы, различающиеся мерой влияния естественной или искусственной реверберации; особый интерес представляет степень различимости сигналов стереофонической фонограммы, воспроизводимых по отдельности. Сигналы, входящие в такие пары, будем называть гомеоморфными. В предельном случае, когда заметные на слух различия отсутствуют, гомеоморфные сигналы становятся изоморфными.

Для установления изоморфизма двух сигналов или для оценки их различимости сравниваемые сигналы, воспроизводимые на одинаковом среднем уровне посредством одной и той же электроакустической аппаратуры достаточно высокого качества, прослушиваются группами людей в умеренно реверберирующем помещении. После одного или нескольких предъявлений сигналов, зашифрованных обозначениями A и B, один из них, предъявляемый затем под шифром X, должен быть отождествлен каждым из слушателей либо с A, либо с B. Возможен также и отказ от ответа, если слушатель не в состоянии обнаружить различие предъявляемых ему сигналов.

Пусть из общего числа n ответов, полученных при прослушивании некоторой пары гомеоморфных сигналов, p оказались правильными, q — ошибочными и, кроме того, $n-(p+q)$ слушателей отказались от ответа.

Мерой различимости сравниваемых сигналов можно считать величину

$$d = \frac{|p-q|}{n} 100\% \cdot \qquad (6)$$

По поводу этого определения нужно заметить, что если слушателям предъявляются практически неразличимые варианты какого-либо звучания, то полученные ответы с одинаковой вероятностью могут оказаться как правильными, так и ошибочными. При этом по мере возрастания n разность $p-q$ (а следовательно, и d) стремится к нулю. При конечном числе слушателей значения $p-q$, малые по абсолютной величине, могут иметь любой знак, распределяясь симметрично относительно нуля. Символ абсолютной величины числителя в определении (6) означает, что при любом знаке разности $p-q$ различимость сигналов, близких к изоморфизму, определяется одной и той же малой величиной; отрицательные значения d, конечно, не имеют смысла.

Предъявляемые варианты безошибочно различимы ($d=100\%$), когда $p=n$ и, следовательно, $q=0$. Различие, которое соответствует различимости $d_{\text{пор}}=50\%$, можно считать пороговым.

В исследовании различимости сигналов встречаются случаи, требующие несколько более детализированной оценки заметности различия. Исследованию может подлежать семейство гомеоморфных сигналов, различающихся по некоторому параметру, например, по верхней или нижней границе полосы воспроизводимых частот, по коэффициенту нелинейных искажений, по уровню подмешиваемого реверберирующего сигнала и т. п. Здесь нужно считаться с тем, что различие, ставшее уверенно заметным ($d=100\%$) при некотором определенном значении параметра, продолжает усиливаться, становясь все более интенсивным по мере дальнейшего изменения параметра в том же направлении. В этих случаях в качестве меры различимости удобнее принять число пороговых единиц, т. е. число интервалов между дискретными значениями исследуемого параметра, соответствующими разностным порогам заметности различия.

Пусть z есть варьируемый параметр, по которому различаются гомеоморфные сигналы некоторого семейства; символом $F(z_0)$ обозначим сигнал, соответствующий начальному значению z_0 параметра z (в частности, возможен и случай $z_0=0$). Сначала под шифрами A и B слушателям предъявляются сигналы $F(z)$ и $F(z_0)$. Пусть при $z=z_1$ различие достигает порога заметности ($d=50\%$). Если различие сравниваемых сигналов прогрессирует при $z>z_1$, то в следующем испытании под шифрами A и B предъявляются сигналы $F(z)$ и $F(z_1)$, причем теперь z заключено в интервале $z_1<z\leqslant z_2$, где z_2 соответствует следующему (второму) разностному порогу. В общем случае, когда параметр z лежит в интервале $z_{i-1}<z<z_i$, где i — порядковый номер испытания (или, что то же самое, число обследованных интервалов), различимость сигналов $F(z_i)$ и $F(z_0)$ составляет i пороговых единиц.

Необходимо подчеркнуть, что различимость неизоморфных сигналов определяется не только их объективными различиями, но зависит и от способности услышать разницу: поэтому понятия изоморфизма и различимости определены всегда относительно того или иного контингента слушателей. Известно, например, что нарушение изоморфизма выходного и входного сигналов, обусловленное искажением в процессе передачи, гораздо увереннее обнаруживается людьми с профессионально тренированным слухом. Люди с хорошей слуховой памятью легче выполняют правильное отождествление сигнала X с A или с B при незначительном их различии. Зависимость различимости от факторов, характеризующих выбранную группу слушате-

лей, не лишает эту величину объективной значимости, если только не забывать о том, что она относится к приемникам информации с некоторыми частными, но объективно определимыми свойствами.

Важнейшим и наиболее общим из этих свойств является способность сравнения двух информаций по признаку их тождества или различия. В соответствии со смыслом, вложенным в понятие изоморфизма, два изоморфных сигнала несут одну и ту же информацию, тогда как гомеоморфные сигналы, в той или иной мере различимые, несут информации, совпадающие лишь частично. Здесь пользуемся термином «информация» в широком и чаще всего подразумеваемом смысле, а не в обезличенном теоретико-вероятностном определении. Действительно, это определение не позволило бы установить различие двух информаций с одной и той же энтропией распределения мгновенных значений соответствующих сигнальных функций подобно тому, как путем взвешивания нельзя отличить друг от друга два разных груза одинаковой массы.

Конечно, это вовсе не значит, что операция взвешивания бесполезна; точно так же не нужно доказывать, что ни плодотворность статистических методов теории связи, ни возможность обобщения принятого в ней определения информации не лишают права пользоваться этим термином просто для обозначения того, что получатели сообщения извлекают из принятого сигнала.

Тот факт, что полностью когерентные сигналы не могут не быть изоморфными и что неизоморфные сигналы всегда в той или иной мере некогерентны, заставляет думать о некоторой аналогии понятий изоморфизма и когерентности. Аналогия может быть прослежена достаточно далеко; поэтому нужно отчетливо разграничить значение, специфику и область применения обоих сопоставляемых понятий. Основное и принципиальное различие между ними заключается не в том, что изоморфизм и различимость определены относительно приемников информации с какими-то особыми только им присущими свойствами. Ведь в определении коэффициента когерентности (4) и (5) также входят характеристики приемника, от которых зависит результат усреднения при измерении текущей корреляции; эти характеристики отображаются весовой функцией (1).

Более существенным представляется то обстоятельство, что коэффициент когерентности сигналов, как это было показано, определяет сходство или различие их форм на основе чисто энергетического критерия. Энергетическая оценка когерентности, введенная и принятая в оптике, очевидным образом связывается с тем, что мерой наблюдаемого воздействия света на тела является освещенность — поток лучистой энергии на единицу площади. Целесообразность использования энергетического критерия не ограничивается областью оптики. Так, например, в архитектурной акустике факт практической некогерентности прямого звука и его запаздывающих отражений позволяет рассчитать уровень средней плотности звуковой энергии в помещении и время реверберации.

В отличие от энергетической меры различия между не полностью когерентными сигналами их различимость является мерой, основанной на сравнении не мощностей, но информаций (подразумевается, конечно, сравнение самих информаций, а не их количеств). Коэффициент когерентности и различимость в общем случае не коррелированы между собой. Так, например, даже не очень значительное нелинейное искажение может быть уверенно заметным при сравнении искаженного сигнала с неискаженным несмотря на то, что эти сигналы в высокой степени когерентны. Примером прямо противоположного случая могут служить две заведомо некогерентные реа-

лизации белого шума: при слуховом сравнении такие сигналы неразличимы, т. е. изоморфны.

Отметим, наконец, что отсутствие изоморфизма выходных и входных сигналов вовсе не всегда означает искажение. Справедливо лишь обратное утверждение: всякое заметное на слух искажение, линейное или нелинейное, связано с тем, что выходной сигнал не совпадает по форме с входным. Таким образом, нарушение изоморфизма есть понятие более широкое, включающее искажение в качестве частного случая, отличающегося тем, что изменение формы сигнала дает неприятный или нежелательный эффект.

3. ОБРАБОТКА ПЕРВИЧНОЙ ЗВУКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Как уже упоминалось, электроакустическая передача натуральных звучаний нередко требует предварительной обработки сигналов, из которых формируется передаваемая информация. Когда к качеству передачи предъявляются более или менее строгие требования, подготовка этой информации в большинстве случаев выполняется в два приема. На этапе первичной записи заготовляют фонограммы некоторого числа сигналов, принятых надлежащим образом размещенными микрофонами; на этапе перезаписи эти сигналы подвергаются обработке, необходимость которой связана, помимо соображений эстетического характера, с техническими показателями каналов передачи и с акустической обстановкой воспроизведения.

Говоря о первичной записи, нужно прежде всего отметить, что из одной и той же точки звукового поля в одни и те же отрезки времени можно извлекать сигналы, несущие в общем случае различные, т. е. не полностью совпадающие информации. Поместив, например, в некоторую точку поля измерительный микрофон (ненаправленный приемник давления), получим на выходе микрофонного усилителя сигнал $U_0=C_p$, т. е. напряжение, отображающее практически без искажений ход изменения звукового давления $p(t)$ в выбранной точке. Используя там же приемник градиента давления с характеристикой направленности в форме восьмерки, получили бы сигнал $U_1(\alpha, \beta)$, вообще говоря, не совпадающий с U_0 и зависящий от угловых координат α, β, т. е. от ориентации акустической оси микрофона. Как легко понять, всякий направленный микрофон осуществляет избирательный прием звуковой информации; избирательность обнаруживается тем более значимо, чем острее диаграмма направленности микрофона, чем разнообразнее состав первичных источников и чем шире область их размещения.

Второй этап подготовки передаваемой информации начинается тогда, когда первичные сигналы, одновременно или в разное время извлеченные из звукового поля, представлены записями, которые могут быть синхронно воспроизведены для последующей перезаписи. В ходе обработки первичные сигналы подвергаются различным операциям, многие из которых приводят к более или менее значительному нарушению изоморфизма сигналов на входе и на выходе устройства, выполняющего операцию. При этом имеем в виду лишь намеренно предпринимаемые преобразования сигналов, исключая из рассмотрения те, которые обусловлены несовершенством аппаратуры и должны расцениваться как искажения.

Среди операций, выполняемых над сигналами, назовем сначала тождественные преобразования, не приводящие к нарушению изоморфизма. Тождественными преобразованиями являются, во-первых, изменение уровня сигнала (неискаженное усиление или ослабление) и, во-вторых, смещение во времени посредством линии задержки; в обоих случаях форма сигнала

остается неизменной. Наряду с этими операциями широко применяются и нетождественные преобразования, связанные с изменением спектральных и динамических характеристик сигнала. Таковы, в частности, операции коррекции и регулирования тембра, частотное ограничение, транспонирование спектра; здесь основным результатом является изменение спектра мощности сигнала. Другим важным частным случаем является преобразование формы сигнала в результате его прохождения через устройство, импульсная переходная функция которого приближенно имитирует реверберацию в закрытом помещении — такие устройства называются ревербераторами (см. прилож. Б).

Особое место занимает операция изменения динамического диапазона сигнала — сжатие или расширение с сохранением или без сохранения среднего уровня. Эта операция осуществляется время от времени (вручную или автоматически), когда возникает опасность выхода в нелинейную область или возможность маскировки сигнала шумом.

Каким бы операциям ни подвергались первичные сигналы по отдельности или группами, в конечном счете они должны послужить слагаемыми одной или нескольких сумм в соответствии с числом каналов электроакустической передачи. Если только оставить в стороне изменение динамического диапазона, то последнее сложение сигналов можно считать итогом обработки первичной информации — композицией канальных сигналов.

На выходной стороне сквозного — от воздуха до воздуха — тракта передаваемые сигналы подвергаются заключительной операции — преобразованию из электрических в звуковые посредством громкоговорителей. Ранее уже было сказано, что преобразование звукового давления в электрическое напряжение, выполняемое на входной стороне тракта, нельзя считать однозначно детерминированной операцией: ее результат зависит от типа ориентации микрофона. Преобразование, осуществляемое громкоговорителем, также неоднозначно, поскольку выходной сигнал зависит не только от условий излучения (в неограниченной среде или в закрытом помещении), но и от выбора места приема. Неопределенность результата преобразования можно в некоторой мере устранить путем ограничения выбора места приема. При работе громкоговорителя в условиях, приближающихся к случаю неограниченной среды, например на открытом воздухе или в помещении с малым временем реверберации, выходной сигнал должен быть принимаем в точках, лежащих на акустической оси громкоговорителя или вблизи от нее. Если же воспроизведение происходит в большом реверберирующем помещении, выходной сигнал следует принимать в той области поля, где многократно отраженная звуковая энергия значительно преобладает над прямой. В обоих случаях сигналы, принимаемые в различных точках вторичного поля, при соблюдении указанных условий будут изоморфными. При заданном входном сигнале форма выходного сигнала определяется в первом случае частотной характеристикой чувствительности громкоговорителя, во втором — процессом реверберации и частотной характеристикой акустической мощности, излучаемой громкоговорителем в режиме постоянства напряжения.

Переходя к рассмотрению свойств перечисленных здесь операций, каждая из которых может быть символически представлена действием некоторого оператора на сигнальную функцию, введем следующие определения:

1. Оператор A, действующий на сигнал f, назовем обратимым, если можно реализовать оператор A^{-1} такой, что

$$A^{-1}[A(f)] \sim f, \tag{7}$$

где $A(f)$ — сигнал, получающийся из f в результате действия оператора A, а знак «$\sim$» выражает соотношение изоморфизма.

2. Оператор A называется линейным, если

$$A(f_1 + f_2 + \cdots) \sim [A(f_1) + A(f_2) + \cdots]. \qquad (8)$$

Заметим, что в определениях (7) и (8) говорится не о тождестве или пропорциональности сигнальных функций, но об изоморфизме соответствующих сигналов. Таким образом, в этих определениях свойства операторов, используемых при обработке звуковой информации, устанавливаются в соответствии со статистически обоснованными характеристиками ее слухового приема.

За исключением оператора $D(f)$, представляющего изменение динамического диапазона сигнала, все рассматриваемые здесь операторы являются линейными до тех пор, пока в выходном сигнале не будут уверенно прослушиваться нелинейные искажения.

Операторы, представляющие тождественные преобразования — изменение уровня $L(f)$ и смещение во времени $T(f)$ — в линейной области обратимы. Что касается нетождественных преобразований — изменения спектра $S(f)$ и введения искусственной реверберации $R(f)$, то обратимым является только оператор S. Необратимость оператора R легче всего пояснить на примере магнитного ревербератора, выходной сигнал которого при входном сигнале $f(t)$ имеет вид

$$F(t) = \sum_i a_i f(t - \tau_i) ,$$

где a_i — убывающая последовательность коэффициентов, определяющих ослабление эхо-сигналов по мере возрастания задержки τ_i. Оператор, преобразующий f в F, был бы обратимым, если бы существовала возможность однозначного разделения суммы сигналов на ее составляющие с последующим сохранением одной из них и подавлением всех остальных.

Заметим, что здесь констатируется необратимость операции сложения сигналов, если и не тождественных, то во всяком случае изоморфных, различающихся друг от друга только положением на оси времени; очевидно, что операция необратима и при сложении неизоморфных сигналов. Если складываемые сигналы сравнимы по уровню, то их сумма не будет изоморфной при ее сопоставлении с любым слагаемым в отдельности.

Оператор $D(f)$ нелинеен, поскольку и моменты его «включения», и мера его воздействия зависят от текущего уровня сигнала $f(t)$. Вопрос об обратимости оператора D решается положительно, поскольку система, состоящая из каскадно включенных компрессора и экспандера, в принципе не вступает в противоречие с условием физической осуществимости.

Рассмотрим, наконец, вопрос об обратимости линейных операторов электроакустического преобразования. Обозначим через $M(p)$ операцию приема звука микрофоном, т. е. преобразование звукового давления $p(t)$ в электрический сигнал $U(t)$; через $H(U)$ обозначим давление, создаваемое громкоговорителем при входном сигнале $U(t)$. Можно ли (а если можно, то при каких условиях) утверждать, что

$$H[M(p)] \sim p,$$

т. е. что оператор H выполняемого громкоговорителем преобразования совпадает с M^{-1}? При этом предполагается, что как микрофон, так и громкоговоритель отвечают современным требованиям, предъявляемым к аппаратуре высшего класса.

Наличие или отсутствие изоморфизма сигналов p и $H[M(p)]$ согласно определению должно быть установлено путем слухового сравнения сигнальных функций $U_0 = C_p$ и $U' = C'_p$, воспроизводимых в одних и тех же условиях (см. § 2). Здесь U_0 представляет «эталонный» сигнал, полученный от измерительного микрофона (приемника давления), который в первичном поле должен находиться рядом с исследуемым микрофоном; U' есть напряжение, развиваемое тем же измерительным микрофоном под воздействием звукового давления $p' = H\ [M(p)]$. Чтобы исключить влияние отраженных волн на воспроизводимый громкоговорителем сигнал, будем рассматривать p' как осевое давление в неограниченной среде. Как уже было показано, сигналы U_0 и U' могут быть изоморфными лишь при условии, что операция $M(p)$ осуществляется ненаправленным микрофоном. Конечно, мера различимости этих сигналов зависит от направленности исследуемого микрофона, от его местонахождения и ориентации, но прежде всего от степени информационной неоднородности первичного звукового поля.

Применительно к сквозному электроакустическому каналу обратимость рассматриваемых преобразований или, точнее, соотношение

$$H[L(U)\ .\ .\ M(p)] \sim p \tag{9}$$

нередко считают условием неискаженной звукопередачи, определяющим те требования, которые должны быть предъявлены к сквозным характеристикам трактов. Изложенные соображения, а также сложившаяся к настоящему времени технология показывают, что условие (9) имеет смысл и может соблюдаться лишь в относительно редких случаях, не представляющих принципиального интереса. Хорошо себя оправдавшая техника полимикрофонного звукоприема с применением направленных микрофонов и с широким использованием нетождественных преобразований в большинстве случаев лишает условие (9) какого бы то ни было отношения к реальной действительности.

Было бы ошибочно думать, что невыполнение этого условия обусловлено несовершенством современной электроакустической техники и свидетельствует о ее неспособности к «точному» воспроизведению звучаний, допустимых слуховому восприятию на входной стороне сквозной системы передачи. Как выяснится в дальнейшем, специфика воспроизведения речи и в особенности музыки в условиях, значительно отличающихся от ситуации на входной стороне, требует особой обработки передаваемых сигналов, их приспособления к этим условиям; только успешное решение этой задачи и позволяет в максимально возможной степени сохранить художественную ценность передаваемого звучания.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТИПЫ ЗВУКОВЫХ СИСТЕМ

4. ФУНКЦИОНАЛЬНО ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ СО СВОБОДНЫМ ДОСТУПОМ

Звуковыми системами называем сквозные электроакустические тракты, начинающиеся с источников электрических сигналов звуковой частоты (например, с микрофонов или магнитофонов) и заканчивающиеся, как правило, громкоговорителями. Промежуточные звенья составляются в общем случае из усилителей, аппаратуры записи и воспроизведения звука, устройств для коммутации, преобразования и обработки

сигналов, а также для модуляции и демодуляции электромагнитных колебаний.

Ограничиваясь здесь и в дальнейшем звуковыми системами, предназначенными для передачи натуральных звучаний, кроме того, исключаем из рассмотрения телефонные сети, диспетчерскую связь, устройства для усиления и перевода речей, системы оповещения и сигнализации и т. п. Во всех перечисленных случаях основные требования, определяющие выбор технического решения, вытекают из условия достаточно высокой разборчивости передачи, чаще всего (хотя и не обязательно) речи. Наряду с этим существуют и такие системы, применительно к которым условие разборчивости никоим образом нельзя считать достаточным. Таковы, в частности, системы, используемые в технике звукового кино, в грамзаписи, в радиовещании и телевидении. Важнейшая особенность, отличающая эти системы, заключается в том, что их выходные сигналы подлежат эстетической оценке. Было бы неправильно думать, что положительный знак такой оценки обеспечивается только техническим совершенством отдельных звеньев звуковой системы — высокой степенью линейности, широкой полосой частот и т. п. Понятие точности (или лучше сказать, верности) передачи приобретает здесь более глубокий смысл и не должно связываться с требованием изоморфизма сигналов на входе и на выходе звуковой системы. Не только условие изоморфизма, но и гораздо более общее предположение об однозначности функциональной связи между этими сигналами не может и не должно относиться к системам, оцениваемым с эстетических позиций.

Специфика звуковых систем, несущих не только семантическую, но и эстетическую информацию, с особенной отчетливостью обнаруживается на примере звукового фильма. В этом случае получателю одновременно адресуются два потока информации — изображение и звук. Эти два потока, конечно, не независимы один от другого, однако их сочетание не должно быть ограничено тривиальной связью видимого объекта с присущим ему звучанием.

Зрительная часть информации представляет собой последовательность монтажных кадров с чередованием общих, средних и крупных планов, со сменой углов и точек зрения. При композиции кадра режиссер и оператор нередко прибегают к оптическим деформациям различного типа — к нерезкости изображения, искажению пропорций, необычной перспективе, наплывам, многократной экспозиции и т. п. Все это относится к основным выразительным средствам киноискусства и едва ли разумно в качестве условия точности требовать, чтобы зрителю на экране было показано то же самое, что он увидел бы, находясь на съемочной площадке.

Аналогично конструируется и звуковая часть информации. Композиция одного или нескольких выходных сигналов осуществляется, как правило, в процессе перезаписи. Источниками первичных сигналов являются не только фонограммы, синхронные с изображением, но и записи, сделанные в другом месте и в другое время, в частности взятые из фонотеки. Первичные сигналы или сигналы, полученные путем сложения первичных, подвергаются разнообразной обработке с широким использованием нетождественных преобразований. В отдельных случаях прибегают и к далеко идущему искажению сигнала, например к транспонированию его спектра или к инверсии (обращению во времени). Таким образом звук, воспроизводимый в кинотеатре, даже в порядке идеализации нельзя рассматривать как приближенно точное отображение какой-либо реально существовавшей звуковой ситуации. Этот вывод следует относить не только к звуковому сопровождению кинофильма, но в общем случае и к музыке, записанной на

грампластинке или магнитной ленте, а также к музыкальной или литературно-драматической передаче.

Изложенные здесь соображения побуждают отчетливо разграничить два типа звуковых систем. К одному из них принадлежат функционально детерминированные системы, выходные сигналы которых с точностью до уровня предопределены акустической обстановкой на входной стороне. К другому типу относятся звуковые системы со свободным доступом, используемые там, где ставится задача передать наряду с семантической еще и эстетическую информацию. При заданном наборе входных (первичных) сигналов здесь должна быть налицо возможность выбора одного из многих технически осуществимых вариантов композиции сигналов, воспроизводимых затем на выходной стороне. Электроакустическая передача натуральных звучаний, оставаясь техникой, становится вместе с тем искусством не только благодаря свободе этого выбора, но и вследствие того, что различные композиционные решения далеко не равноценны эстетически.

Неопределенность выходных сигналов в системах со свободным доступом снимается в процессе отбора и творческой переработки звуковой информации, привлекаемой или потенциально доступной на входной стороне. Такую обработку информации принято называть звукорежиссурой. (Лицо, осуществляющее звукорежиссуру, называют по-разному: в радиовещании и телевидении — звукорежиссером, в кинематографии — звукооператором. Во многих случаях звукорежиссура является коллективным творчеством; так, например, звуковое сопровождение кинофильма должно быть подготовлено совместно режиссером и звукооператором. Будем пользоваться термином «звукорежиссер».)

Отметим особо, что рассматривая электроакустическую передачу не как пассивное отображение, а как активное конструирование звукового поля, распространяем этот принцип и на информацию о размещении источников звука, если в ней возникает надобность. Пространственная характеристика воспроизводимого звукового образа в многоканальных системах со свободным доступом создается путем надлежащей композиции канальных сигналов и не является, как нередко предполагают, детерминированным результатом, непосредственно вытекающим из структуры стереофонической системы.

5. ОБЩАЯ СХЕМА И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВУКОВЫХ СИСТЕМ

На рис. 7 изображена в достаточной мере общая схема, представляющая в качестве частных случаев различные формы звуковых систем (как со свободным доступом, так и функционально детерминированных), встречающихся в современной технической практике.

В левой части схемы на входной стороне системы показаны каналы звукоприема, число Q которых определяется как число взаимно неизоморфных сигналов F_1, F_2, . . ., F_Q, получаемых либо непосредственно от микрофонов, либо путем воспроизведения записей, а иногда от устройств, преобразующих форму сигнала (например, реверберaторов).

Символ T обозначает совокупность устройств, с помощью которых из Q первичных сигналов приготовляются N канальных сигналов φ_1, φ_2, . . ., φ_N, подлежащих передаче на выходную сторону звуковой системы. В большинстве случаев промежуточным этапом является запись этих сигналов на дорожках N-канальной фонограммы; при передаче по радио функция $\varphi(t)$ относится только к модулирующему сигналу. Совокупность T может заключать в себе коммутационные и смесительные устройства, регуля-

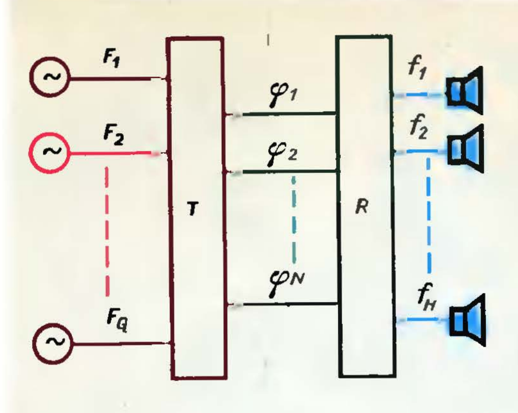


Рис. 7.

торы уровня и тембра, ревербераторы и т. п. Подчеркнем, что в звуковых системах со свободным доступом этот доступ реализуется обычно через систему T, причем число Q первичных сигналов более или менее значительно превышает число N каналов передачи или записи.

В правой части рис. 7 изображены каналы воспроизведения, число H которых определяется как число взаимно неизоморфных сигналов $f_1, f_2, \ldots, \ldots, f_H$, подводимых к громкоговорителям (в некоторых специальных случаях к наушным телефонам). Символ R обозначает совокупность устройств, посредством которых из N канальных сигналов получаются H воспроизводимых. Вообще говоря, числа N и H могут не совпадать; случай, когда $H=N$, а сигналы φ_i, f_i попарно изоморфны, является частным (например, так обстоит дело при показе звукового фильма в кинотеатре).

Нужно иметь в виду, что число Q входит в структурную характеристику звуковой системы лишь постольку, поскольку предоставляемые ею технические средства ограничивают максимальное число первичных сигналов, обрабатываемых в процессе звукорежиссуры. Фактическое число первичных неизоморфных сигналов зависит от состава и размещения источников и, конечно, от характера звукового материала. На основе общей схемы рис. 7 можно предложить следующую классификацию звуковых систем в зависимости от чисел N и H, характеризующих их структуру (табл. 1).

Таблица 1

Типы систем	N	H	Типы систем	N	H
Монофонические	1	1	Псевдостереофонические	$\geqslant 2$	1
Квазистереофонические	1	$\geqslant 2$	Стереофонические	$\geqslant 2$	$\geqslant 2$

Заметим, что перечисленные в таблице звуковые системы не следует представлять себе в виде каких-то структурно неизменных комплексов аппаратуры и каналов; здесь имеются в виду те или иные формы использования технических средств, выбранных в соответствии с некоторой конкретной задачей. В технической литературе термины «псевдостереофония» и «квазистереофония» нередко встречаются как синонимы и относятся обычно к случаям, когда $N\geqslant 2$ и $H=1$. Нам представляется целесообразным различать эти термины в соответствии с предлагаемой классификацией.

6. СТРУКТУРНЫЕ ФОРМЫ ЗВУКОВЫХ СИСТЕМ. МОНОФОНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

Монофонические системы можно определить как такие, в которых $N=H=1$ и $\varphi\sim f$, каково бы ни было число первичных сигналов и громкоговорителей, воспроизводящих один и тот же сигнал на выходной стороне.

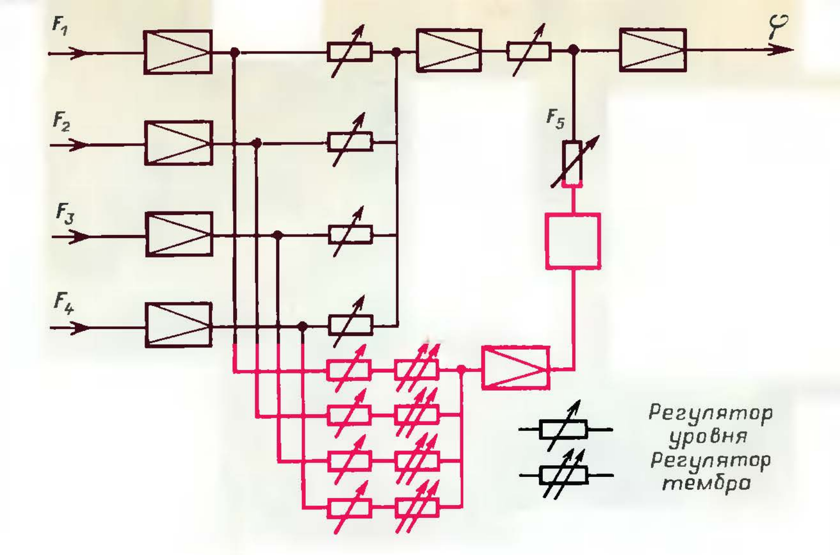


Рис. 8.

В качестве не слишком сложного, но и не самого простого примера на рис. 8 изображена принципиальная схема обработки первичных сигналов, предоставляющая звукорежиссеру разнообразные возможности выбора оптимальной композиции моносигнала при передаче оркестровой музыки. Сигналы $F_1, \ldots, F_4$ получаются от микрофонов, размещение и диаграммы направленности которых выбраны с расчетом на достаточно полный охват различных групп инструментов. Подбирая то или иное соотношение уровней этих сигналов, звукорежиссер добивается надлежащего баланса звучаний отдельных инструментов и исполнителей. К взвешенной сумме $\sum_{1}^{4} a_i F_i$ звукорежиссер может добавить преобразованную ревербератором P сумму F_5 тех же сигналов, смешанных так, чтобы создать желаемые акустические планы (близкий, средний или дальний) звучания различных составляющих сложного звукового образа с характерными для каждого из них оттенками тембра.

Не нужно думать, что сигналы подвергаются звукорежиссерской обработке одновременно с исполнением передаваемого музыкального произведения. Изыскание оптимального варианта композиции при этом потребовало бы неоправданно большого числа оркестровых репетиций; в противном случае воспроизводимое звучание могло бы оказаться неполноценным. Гораздо лучший результат можно получить, заготовив при первичной записи достаточно большое число фонограмм, представляющих (с запасом!) различные компоненты сложного звучания; оптимальное решение художественной задачи должно быть найдено в процессе последующей перезаписи. Если рассматривать рис. 8 как схему перезаписи, то символы $F_1, \ldots, F_4$ будут означать сигналы, воспроизводимые с уже имеющихся фонограмм.

СТЕРЕОФОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ДВУХКАНАЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА И КВАДРАФОНИЯ

Рассмотренный пример монофонической передачи относится, как легко видеть, к звуковой системе со свободным доступом. Переходя теперь к стереофонической передаче, выберем несколько примеров из числа функционально детерминированных систем. Дело в том, что именно такие системы обычно являются объектами теоретического или экспериментального исследования с целью выбора оптимальной (в свете того или иного критерия) структурной формы.

Одним из примеров служит так называемая *AB*-система (рис. 9, *а*). На ее входной стороне находятся два микрофона, обычно с параллельно ориентированными осями; один из них *A* принимает сигналы преимущественно от источников, размещенных на левой стороне, другой *B* обнаруживает такую же избирательность по отношению к источникам в ее правой части. При двухканальной передаче соответствующие сигналы излучаются левым и правым громкоговорителем, в силу чего возникает более или менее впечатляющая иллюзия переноса слушателя в первичное звуковое поле.

Система, представленная на рис. 9, *б*, также двухканальная, иллюстрирует другую разновидность эффекта переноса. Неизоморфные сигналы F_1 и F_2, первый из которых несет информацию, связанную главным образом с прямым звуком, а второй отображает преимущественно диффузную составляющую первичного поля, воспроизводятся соответственно фронтальными f_1 и распределительными f_2 громкоговорителями. При оптимальном соотношении уровней этих сигналов слушатель чувствует себя находящимся в большом зале с присущей ему реверберацией.

Одним из основных недостатков *AB*-системы, из-за которого она не получила признания в технике двухканальной стереофонии, явилась невозмож-

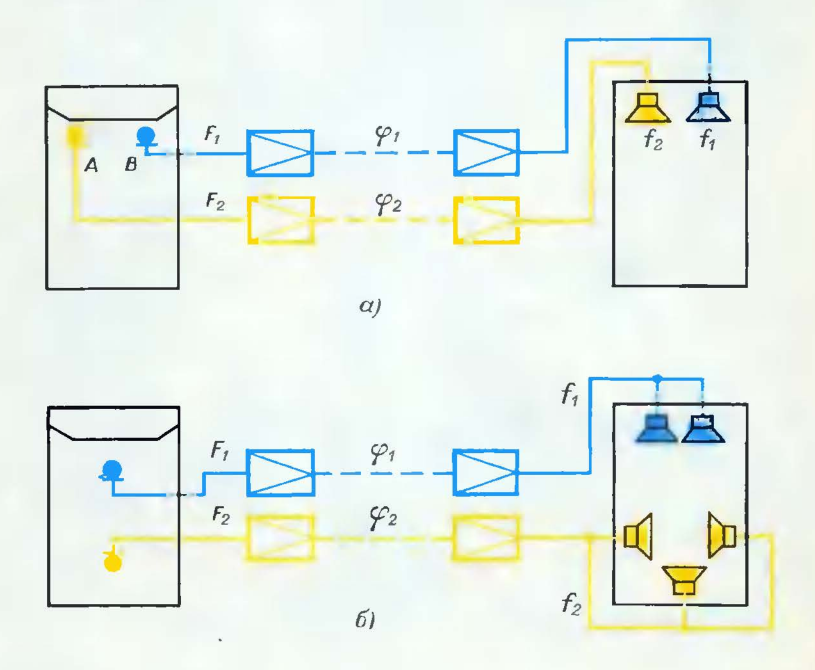


Рис. 9.

ность удовлетворить условию совместимости. Дело в том, что в интересах слушателей, не располагающих стереофонической аппаратурой, двухканальные записи и передачи должны допускать простую возможность воспроизведения обычными проигрывателями и приемниками. Условие совместимости технически сводится к тому, чтобы сумма двух канальных сигналов полноценно звучала при монофоническом ее воспроизведении. Но, как нетрудно видеть, при сложении сигналов, принимаемых микрофонами A и B, неизбежны частотные искажения, связанные с разностью ходов звуковых волн от источника до каждого из микрофонов и, следовательно, с соответствующими интерференционными эффектами. Для ослабления их влияния (а также и по соображениям более общего характера [1]) были разработаны так называемые совмещенные микрофоны, представляющие собой возможно более тесную пару приемников с различными или различно ориентированными диаграммами направленности.

Обращаясь к схеме, изображенной на рис. 9, *а*, можно представить себе, что вместо двух пространственно разнесенных микрофонов в первичном поле установлен совмещенный микрофон, составленный из двух приемников с кардиоидными диаграммами направленности, одна из которых ориентирована своей акустической осью вправо, а другая влево. Такая ориентация приводит к соответствующей избирательности по отношению к источникам, находящимся в правой и в левой части эстрады. Двухканальная система с использованием совмещенного микрофона дает примерно такой же стереофонический эффект, как и AB-система, однако с улучшенной совместимостью, поскольку сигнал от любого источника практически одновременно приходит к обоим приемникам пары.

Используя совмещенный микрофон, можно осуществить не только раздельную передачу «правой» и «левой» информации, но также разделение прямого и диффузного звука, как это сделано в системе рис. 9, *б*.

Предположим ради конкретизации, что приемники совмещенного микрофона имеют одинаковые осевые чувствительности и что их акустические оси развернуты на $\pm 45°$ относительно плоскости симметрии, образуя между собой угол $90°$. Можно показать (см. прилож.А), что при синфазном сложении выходных напряжений совмещенных приемников их комбинация будет представлять собой односторонне направленный микрофон с акустической осью, лежащий в плоскости симметрии, и с диаграммой направленности, более широкой, чем кардиоида. При противофазном же сложении результирующая характеристика направленности будет иметь форму восьмерки, причем плоскость нулевой чувствительности совпадает с плоскостью симметрии пары.

Если в схеме на рис. 9, *б* заменить два микрофона одним совмещенным и направить акустическую ось синфазной пары в сторону эстрады, то развиваемое ею напряжение U_+ представит преимущественно прямой звук, приходящий спереди, тогда как напряжение, развиваемое при противофазном включении U_-, будет нести информацию, связанную главным образом с отражениями звука от боковых стен, поскольку на них направлены лепестки полярной диаграммы противофазно работающей пары. Подавая напряжение U_+ и U_- соответственно на первый и второй каналы, реализуем двухканальную систему, в принципе не отличающуюся от изображений на рис. 9, *б*.

Описанные свойства совмещенного микрофона характеризуют не только рассмотренный частный случай. В более общем случае акустические оси

---

[1] Эти соображения станут ясными из дальнейшего изложения.

компонентов пары могут быть развернуты на больший или меньший угол, а диаграмма направленности не обязательно должна быть кардиоидой. Обозначим символами X и Y «правую» и «левую» информации, принимаемые компонентами пары, ориентированными в соответствующих направлениях. Символами M и S обозначим информации, связанные преимущественно с прямым M и с диффузным S звуком[1]. Общие свойства более или менее широкого класса совмещенных микрофонов описываются символическими соотношениями

$$\left.\begin{aligned} X+Y=M;\ M+S=X;\\ X-Y=S;\ M-S=Y. \end{aligned}\right| \qquad (10)$$

Знак равенства в этих формулах выражает соответствие информаций, не столько количественное, сколько чисто качественное.

Из соотношений видно, что можно получить один и тот же результат при различных комбинациях компонентов совмещенной пары. Одна из комбинаций — совмещение двух направленных микрофонов с развернутыми осями рассмотрена; этот вариант обозначается символом XY. Другой вариант получается путем совмещения микрофона одностороннего приема (например, с кардиоидной диаграммой) и приемника градиента давления с диаграммой в форме восьмерки, продольная ось которой направлена перпендикулярно к полярной оси; такая комбинация обозначается символом MS. Каждый из этих вариантов позволяет разделять информации X, Y или M, S.

Две системы одной и той же структуры, изображенные на рис. 9, представляют два вида двухканальной стереофонии, различающиеся содержанием той дополнительной информации, передача которой становится возможной благодаря наличию второго канала. В одном случае эта информация касается распределения источников по фронту, в другом она относится к акустической обстановке первичного звукового поля.

Примером структурно более сложной двухканальной системы, способной одновременно передавать оба типа дополнительной информации, может служить стереоамбиофоническая система, предложенная Л. Кейбсом [Л. 30]. Схема системы приведена на рис. 10. В первичном поле устанавливаются два совмещенных микрофона, один из которых находится поблизости от эстрады, а другой — в достаточном отделении от нее, т. е. там,

[1] Символы M и S, принятые в немецкой литературе, являются начальными буквами слов Mitte (середина) и Seite (сторона).

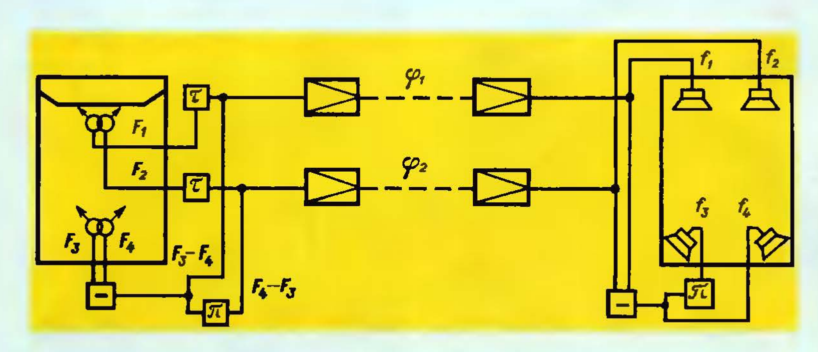


Рис. 10.

где отраженная звуковая энергия значительно преобладает над прямой. Ближайший к эстраде микрофон работает по схеме XY, так что вырабатываемые им сигналы F_1 и F_2 представляют «правую» и «левую» информации. С более удаленного XY-микрофона снимается разность вырабатываемых им сигналов, отображающая диффузную составляющую звукового поля. Сигналы F_1 и F_2 от первого микрофона подаются на входы каналов передачи с задержкой τ, компенсирующей время пробега прямого звука между микрофонами. Как видно из схемы, противофазные сигналы $F_3 - F_4$ и $F_4 - F_3$ от второго микрофона, складываясь с сигналами F_1 и F_2, придают канальным сигналам вид:

$$\varphi_1 \sim \left[F_1 + \frac{1}{2}(F_3 - F_4)\right];$$

$$\varphi_2 \sim \left[F_2 - \frac{1}{2}(F_3 - F_4)\right]$$

(знак $\sim$ выражает соотношение изоморфизма). При воспроизведении из φ_1 и φ_2 приготовляются четыре сигнала:

$$f_1 \sim \varphi_1; \qquad f_2 \sim \varphi_2;$$

$$f_3 \sim -(\varphi_1 - \varphi_2) \sim -[(F_1 - F_2) + (F_3 - F_4)];$$

$$f_4 \sim (\varphi_1 - \varphi_2) \sim [(F_1 - F_2) + (F_3 - F_4)].$$

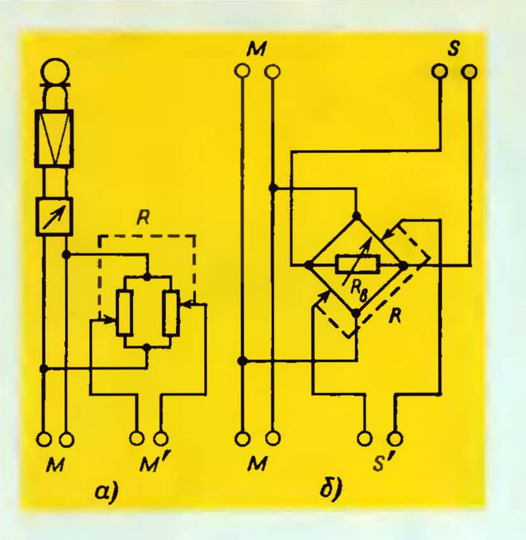
Нетрудно видеть, что сигналы f_1 и f_2 соответствуют случаю стереофонической передачи по системе XY, которая получается из рассматриваемой схемы при выключении второго микрофона и громкоговорителей, воспроизводящих сигналы f_3 и f_4. Представив эти последние в форме

$$f_3 \sim -(S_{\text{I}} + S_{\text{II}}); \qquad f_4 \sim (S_{\text{I}} + S_{\text{II}}),$$

где S_{I} и S_{II} — разности сигналов на выходе каждого из совмещенных микрофонов, видим, что они представляют практически один лишь отраженный звук. Соответствующие громкоговорители расположены и ориентированы с расчетом на рассеяние излучаемой энергии, причем противофазность изоморфных сигналов f_3 и f_4 усиливает, как показывает опыт, впечатление диффузности звукового поля.

Совмещенные микрофоны получили довольно широкое распространение не столько в связи с требованием совместимости, сколько из-за возможности чисто электрического управления эффектами локализации и шириной воспроизводимого звукового образа [Л. 21].

Для разъяснения этой возможности рассмотрим сначала моноканал, начинающийся с односторонне направленного (или ненаправленного) микрофона. Пусть на выходной стороне микрофонного усилителя имеется параллельный канал (рис. 11, *а*), позволяющий отделить ту или иную часть M' сигнала M как синфазно, так и с инверсией фазы. Действительно, в среднем положении обоих скользящих контактов $M' = 0$. Но если правый контакт находится в крайнем верхнем, а левый — в крайнем нижнем положении, то $M' = M$; напротив, $M' = -M$, когда правый контакт занимает крайнее нижнее положение, а левый — крайнее верхнее. При совместном встречном перемещении контактов R из одного крайнего положения в другое напряжение M' изменяется в такой последовательности, как если бы оно получалось от приемника с диаграммой направленности в форме восьмерки при перемещении точечного источника звука по дуге полуокружности, охватывающей оба лепестка диаграммы (рис. 12). Таким образом, напряжения M и M' можно формально рассматривать как сиг-



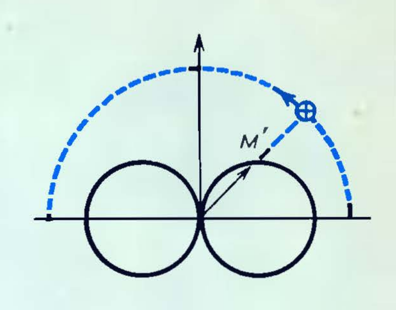


Рис. 11.

Рис. 12.

налы, выдаваемые совмещенным MS-микрофоном при той ориентации источника, которая соответствует положению скользящих контактов R. Отсюда следует, что при воспроизведении суммы $M + M'$ можно, изменяя положение контактов, имитировать перемещение кажущегося источника звука из одного крайнего положения в другое согласно соотношениям

$$M + M' = X, \qquad M - M' = Y.$$

Обратимся к совмещенному MS-микрофону (рис. 11, *б*). Когда скользящие контакты R находятся в любом из двух крайних положений (R поворачивается на $180°$), сигнал S не проходит на выходную сторону схемы; при этом $S' = M' = \pm M$ и источник звука, какова бы ни была его ширина, при воспроизведении локализуется как точка, совпадающая с одним из двух громкоговорителей воспроизводящей системы. Если же контакты находятся в среднем положении, то $M = 0$ и $S' = \alpha S$, где S — сигнал, принятый S-компонентом совмещенного микрофона; α — числовой коэффициент, определяющий долю напряжения, снимаемого с потенциометра $R_в$. При $\alpha = 1$ информация S полностью представлена на выходной стороне схемы; звуковой образ с конечной протяженностью по фронту имеет максимальную ширину, соответствующую возможностям выбранной MS-системы. Если же с помощью потенциометра $R_в$ уменьшать долю α (это эквивалентно снижению чувствительности S-компоненты совмещенного микрофона), то при воспроизведении звуковой образ будет постоянно стягиваться в точку, локализующуюся при $\alpha = 0$ в центре базы громкоговорителей.

Действуя совместно потенциометрами R (регулятор направления) и $R_в$ (регулятор ширины), можно управлять обоими параметрами с теми лишь ограничениями, что максимальная ширина звукового образа определена свойствами сквозной системы и что в любом из крайних положений этот образ становится точечным.

Описанные способы управления направлением на звуковой образ и его шириной осуществимы при условии, что передаваемая информация разделена на компоненты M и S. В связи с этим регуляторы направления и

ширины (рис. 13) имеют переключатель *П*, допускающий подключение к совмещенному микрофону любого типа (*MS* или *XY*). Нужно отметить, что при α = 0 можно работать с обычным (не совмещенным) микрофоном, управляя локализацией источника воспроизводимого сигнала; действительно, при отключении потенциометра $R_в$ схема на рис. 11, *б* превращается в схему на рис. 11, *а*.

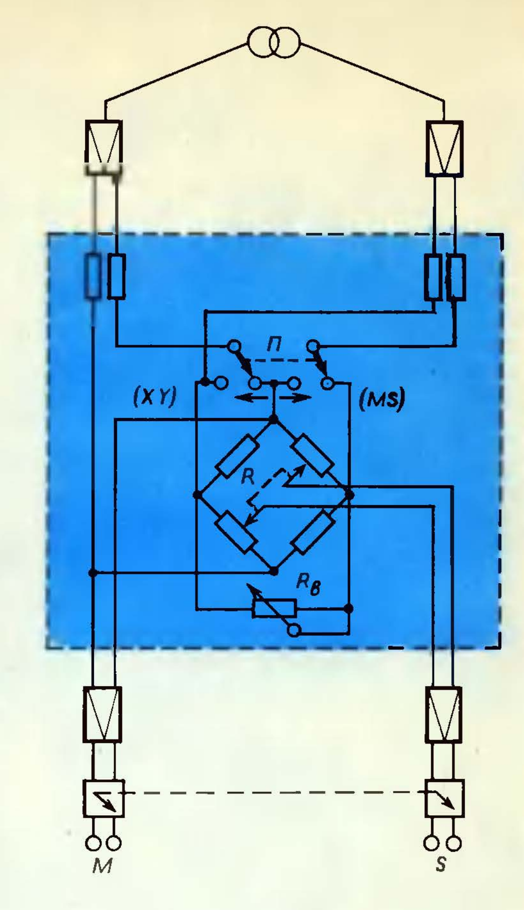


Рис. 13.

Разработка регуляторов направления и ширины была вызвана прежде всего настоятельной необходимостью перехода к полимикрофонной технике не только при монофонической передаче, где она уже стала привычной, но и в стереофонии. Эта необходимость неизбежно вытекает из тех эстетических требований, которым не могут удовлетворить функционально детерминированные системы. При установке нескольких совмещенных микрофонов, закрепленных, например, за различными группами инструментов оркестра, нужно, чтобы соответствующие звуковые образы при воспроизведении были взаимно согласованы как по ширине, так и по направлению локализации, нередко в качестве вспомогательных используются и микрофоны обычных типов, включаемые на оба канала, при этом также необходимо согласование по направлению локализации. Во всех таких случаях задачи звукорежиссуры легко решаются с помощью регуляторов направления и ширины

На рис. 14 изображена часть схемы стереофонического пульта звукорежиссера, где показаны только линии, начинающиеся с совмещенных микрофонов, регуляторы направления и ширины *РНШ* и, кроме того, два ревербератора *Р*, вырабатывающие некогерентные реверберирующие сигналы для подачи их на выходные каналы пульта. Нет надобности разъяснять тот факт, что эта схема является частью звуковой системы со свободным доступом.

Сравнительно недавно в зарубежной периодике появились сведения о новой форме «бытовой» стереофонии, которой присвоено название квадрафонии и предсказывается роль важного этапа технического прогресса в области электроакустики, не менее значительного, чем переход от монофонии к двухканальной стереофонии. Квадрафония или четырехканальная стереофония провозглашается способом почти аудентичного отображения звукового поля концертного зала при воспроизведении музыки в домашних условиях с сохранением не только пространственной

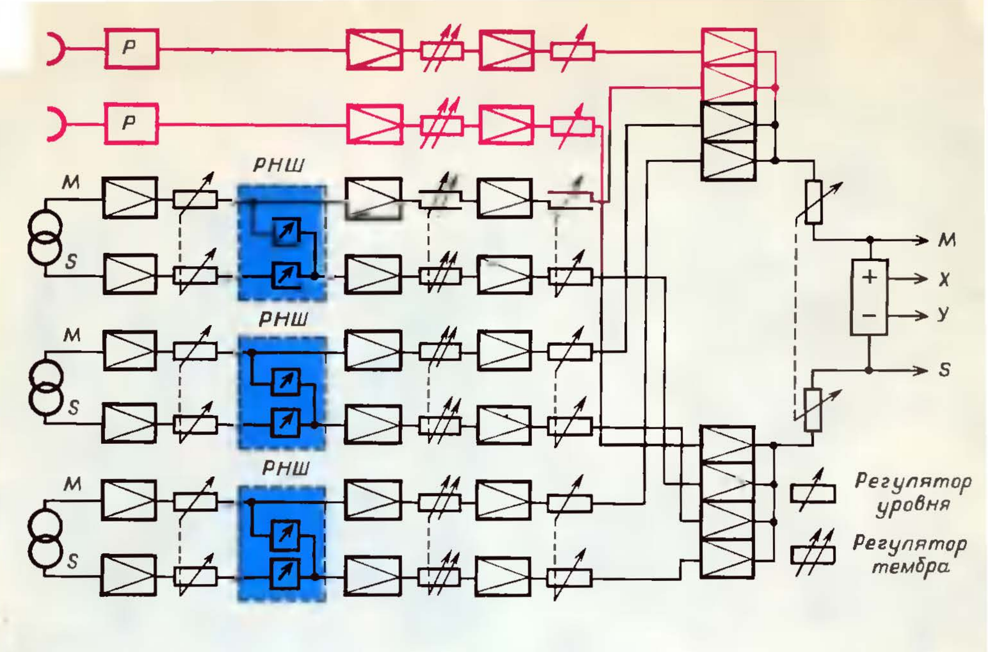


Рис. 14.

картины источников прямого звука, но и диффузной акустической атмосферы зала. Насколько можно судить по опубликованным описаниям [.Л, 20, 45], решение этой задачи представляется в следующем виде.

В концертном зале или студии устанавливаются четыре микрофона, выделяя площадь в форме прямоугольника с размерами, примерно соответствующими площади жилого помещения, в каком обычно осуществляется прием электроакустически передаваемой музыки. Два микрофона, ближайшие к эстраде, являются источниками правого и левого фронтальных сигналов; два более удаленных микрофона вырабатывают правый и левый тыловые сигналы. Сигналы записывают на четырех дорожках магнитной ленты и воспроизводят четырехдорожечными блоками магнитных головок с рабочими зазорами, расположенными на одной прямой. Звуковоспроизведение осуществляют четыре громкоговорителя, размещенные по углам помещения, соответственно расстановке микрофонов в первичном поле. При наличии доброкачественной аппаратуры вторичное поле может с достаточно хорошим приближением имитировать первичное в той его области, которая выделена четырьмя микрофонами.

Как утверждают сторонники квадрафонии, она и только она переносит слушателя из жилой комнаты в концертный зал, тогда как двухканальная стереофония в лучшем случае создает иллюзию переноса первичных источников звука в помещение, где происходит прослушивание. С этим утверждением можно согласиться в той мере, в какой оно подчеркивает большое эстетическое значение реалистической передачи акустического окружения слушателей; кстати сказать, именно этот термин (Surround Sound) фигурирует в качестве одного из синонимов квадрафонии.

Технические задачи, решение которых необходимо для сколько-нибудь широкого распространения квадрафонии, связаны с разработкой техно-

логии радиопередачи четырех информаций и в особенности их записи на граммофонную пластинку. Проводившиеся в США экспериментальные радиопередачи квадрафонической программы через два одновременно работающих стереопередатчика едва ли решают задачу, так как необходимость разделенной настройки двух стереоприемников и отсутствие незанятых участков диапазонов радиочастот создают трудно преодолимые осложнения.

В описанной здесь форме квадрафония представляет собой функционально детерминированную звуковую систему. Вместе с тем имеются сведения и о таких записях, при выполнении которых звукорежиссер, имея в своем распоряжении четыре канала, заканчивающихся квадрафоническим комплектом громкоговорителей, мог по своему усмотрению выбрать число и размещение микрофонов в первичном поле. Высказывались также интересные соображения о возможности подготовки квадрафонических фонограмм с привлечением цифровых вычислительных машин, синтезирующих произвольно выбираемые звуковую обстановку и размещение первичных источников.

Отмеченные трудности внедрения квадрафонии побуждают искать способы передачи четырех сигналов при использовании только двух каналов передачи или записи. Одна из многих предложенных возможностей [Л. 28] поясняется схемой на рис. 15. В первичном звуковом поле микрофоны — левый (Л), центральный (Ц), правый (П) и тыловой (Т) — выдают сигналы, следующим образом распределяемые по двум каналам: центральный сигнал складывается (без инверсии фазы) с правым и левым, а тыловой сигнал вводится в каналы противофазно. При воспроизведении канальные сигналы $Л + Ц + Т$ и $П + Ц - Т$ излучаются соответственно левым и правым громкоговорителями: к центральному громкоговорителю подводится сумма канальных сигналов $Л + П + 2Ц$, в которой преобладает сигнал $Ц$, а к тыловому — разность $Л - П + 2Т$, отображающая преимущественно реверберирующее звучание.

Схема рис. 15 удовлетворяет условию совместимости с обычной двухканальной стереофонией. Действительно, в этом случае канальные сигналы $Л$ и $П$ воспроизводятся соответственно левым и правым громкоговорителями, а центральный излучает их сумму $Л + П$, которая, как правило, должна звучать не хуже того, что может дать монофония. Сигнал $Л - П$, воспроизводимый тыловым громкоговорителем, как утверждают, не ухудшает (скорее даже украшает) стереофоническое звучание музыки.

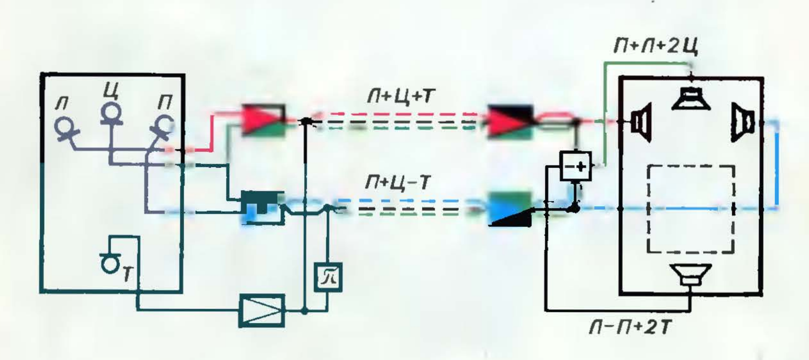


Рис. 15.

Как нетрудно заметить, описанную ранее стереоамбиофоническую систему Кейбса также можно считать квазиквадрафонической. Действительно, на выходной стороне системы из двух передаваемых сигналов приготовляются четыре, излучаемые двумя фронтальными и двумя тыловыми громкоговорителями. Сигналы f_1 и f_2 (см. рис. 10) представляют прямой звук, сигналы f_3 и f_4 — звуковое окружение.

Стереофонические системы, применяемые в звуковой кинематографии, будут подробно рассмотрены в гл. 4.

ПСЕВДОСТЕРЕОФОНИЯ

Панорамный микшер, принципиальная схема которого изображена на рис. 16, *а*, имеет пять выходных каналов и является основным звеном псевдостереофонической системы передачи информации о положении или о перемещении источников воспроизводимого звучания. Эта система широко применяется при обработке и перезаписи звукового материала, подготовленного для широкоформатного фильма.

Как будет показано далее, функционально детерминированная стереофоническая система может обеспечить качественно правильную локализацию источников звука лишь в пределах небольшой части площади слушательских мест. Для того чтобы получить желаемый эффект на всей этой площади (за исключением, быть может, сравнительно малой части), подлежащий локализации моносигнал подается на вход панорамного микшера с характеристикой затухания, представленной на рис. 16, *б*, где абсцисса определяет положение ручки микшера *ПМ*, а ордината — затухание в соответствующих каналах. Как показывает характеристика, сигнал может одновременно поступать не более чем на два канала. Так, например, в положение *1* сигнал подается только на первый канал. При перемещении ручки вправо уровень сигнала в первом канале падает, а во втором возрастает, причем в среднем положении ручки (между отметками *1* и *2*) мощность поровну распределяется между двумя каналами. В дальнейшем уровень сигнала в первом канале убывает до полного подавления, когда (в положении *2*) сигнал подается только на второй канал.

При перезаписи возможны различные виды работы с микшером. В случае движущегося объекта звукооператор перемещает ручку панорамного микшера в соответствии с положением источника, видимого при этом на

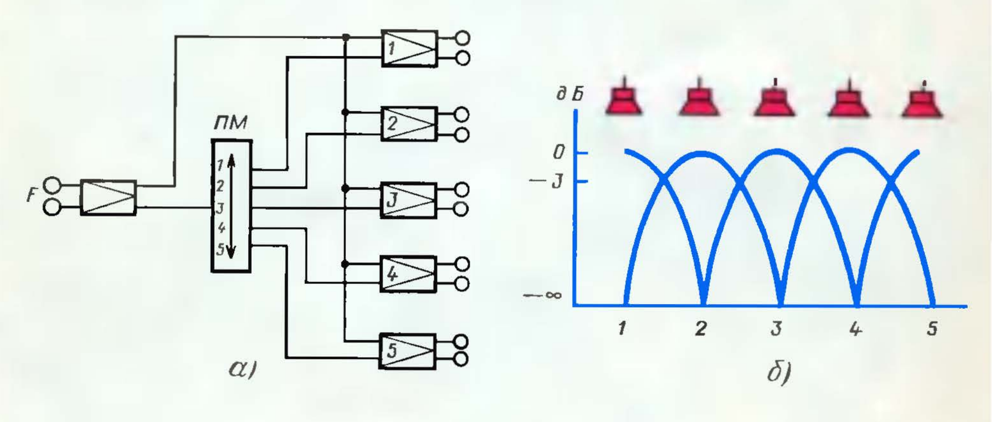


Рис. 16.

экране. Для быстрого переброса сигнала из какого-либо одного канала в любой другой служат контакты, включающие (при нажатии клавиши) или отключающие (при ее опускании) тот или иной канал в обход микшера, т. е. независимо от положения ручки. Наконец, имеется еще клавиша, при нажатии которой моносигнал равномерно распределяется по всем пяти каналам.

Экспериментальные данные, приводимые Г. Гленцелем [Л. 27], убедительно показывают, что псевдостереофонические локализации невидимого источника сигнала действительно обеспечиваются на всей площади мест. Опыты проводились в большом (1 000 мест) кинотеатре «Космос» (Берлин, ГДР), план которого схематически изображен на рис. 17, *а*. На местах, отмеченных на плане точками, были рассажены участники испытаний; им предлагалось определить кажущееся положение источника звука. Для этого перед экраном были расставлены с интервалом в 1,7 м изображения букв *a*, *b*, . . . , *l*, пользуясь которыми слушатели указывали пеленг. Испытательными сигналами служили музыка, пение и белый шум. Соответствующими установками ручки микшера можно было задавать в случайном порядке девять различных локализаций: в пяти точках (*b*, *d*, *f*, *h*, *k*) против мест заэкранных громкоговорителей и в четырех точках (*c*, *e*, *g*, *i*), промежуточных между ними. Результаты испытаний, усредненные по оценкам, которые выносились слушателями в партере, представлены на диаграмме рис. 17, *б*. Высоты вертикальных линий в каждой из девяти групп на этой диаграмме пропорциональны процентному числу указанных пеленгов, причем фактическое положение ручки микшера соответствует буквам в нижней части диаграммы. Самые высокие линии в каждой группе дают относительное число правильных локализаций; линии меньшей высоты соответствуют числу ошибочных пеленгов, смещенных в сторону одной из двух соседних букв. Как и следовало ожидать, точки, лежащие против громкоговорителей, локализуются более уверенно и точно, чем промежуточные точки, пеленгуемые при одновременной работе двух соседних громкоговорителей, излучающих одинаковую мощность. Несмотря на некоторый разброс показаний, достигаемая точность может считаться хорошей, поскольку ошибка лишь в немногих случаях превы-

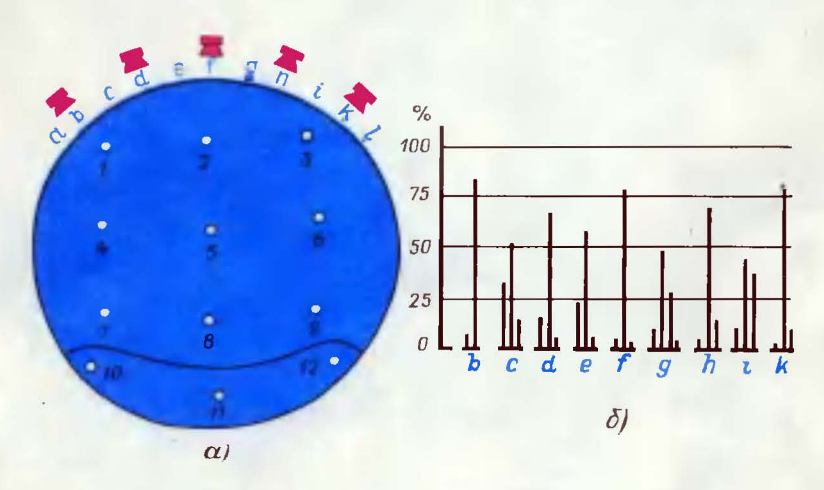


Рис. 17.

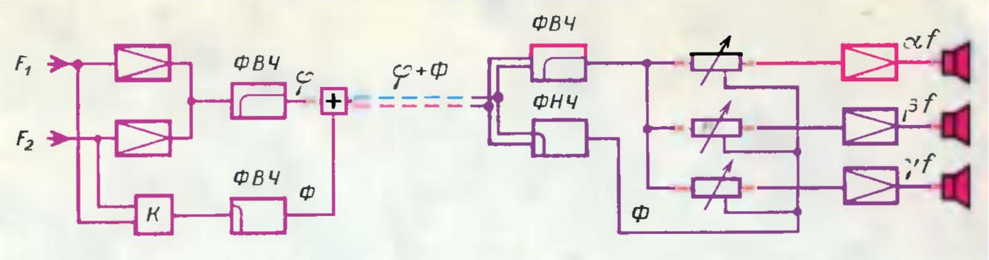


Рис. 18.

шает интервал между соседними буквами. Опыты показали также, что точность локализации снижается по мере удаления слушателя от экрана; это очевидным образом связано с уменьшением угловой ширины единичного интервала. Выяснилось еще, что пеленги с боковых мест нередко смещаются в сторону слушателя.

В рассматриваемом примере псевдостереофоническая передача информации о положении источников звука осуществляется посредством многоканальной системы ($N = 5$), однако $H = 1$, так как на любом отрезке времени громкоговорители на выходной стороне системы излучают изоморфные сигналы, различающиеся только уровнем.

Схема на рис. 18 изображает систему, известную под названием «Перспекта». Здесь сумма сигналов $F_1 + F_2$ пропускается через фильтр верхних частот ФВЧ, срезающий составляющие с частотой ниже 70 Гц. Область более низких частот используется для передачи управляющих сигналов, вырабатываемых кодирующим устройством K в соответствии с текущими значениями выходного уровня в микрофонных каналах. Эти сигналы, передаваемые на несущих частотах 30, 35 и 40 Гц (т. е. в той области, которая выделена фильтром нижних частот *ФНЧ* из спектра сигнала $F_1 + F_2$), управляют уровнями в трех каналах усиления воспроизводимых сигналов. При этом громкоговорители излучают изоморфные сигналы (αf, βf, γf), различающиеся уровнем, так что $H = 1$ (коэффициенты α, β, γ характеризуют регулируемый уровень воспроизводимого сигнала f и, следовательно, определяют его локализацию слушателями). При передаче по системе «Перспекта» используется принцип частотного разделения двух каналов, один из которых несет акустический сигнал φ, а другой — сумму Ф трех управляющих сигналов с неперекрывающимися спектрами, что позволяет разделить их на выходной стороне сравнительно простыми средствами.

Сопоставляя псевдостереофоническую систему «Перспекта» с той, в которой используется панорамный микшер, стоит отметить, что наиболее существенная разница между этими системами определяется не числом каналов, а тем, что одна из них (именно «Перспекта») функционально детерминирована, тогда как другая является системой со свободным доступом.

КВАЗИСТЕРЕОФОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Квазистереофоническими называем такие одноканальные системы, в которых $H \geq 2$; таким образом, их характерная особенность заключается в том, что на выходной стороне из принятого моносигнала приготовляются два или несколько взаимно неизоморфных сигналов.

Наиболее интересный пример представлен на рис. 19. Одним из двух воспроизводимых сигналов является сам принятый моносигнал f_1, подводимый к фронтально поставленному громкоговорителю. Второй сигнал (f_2) получается из первого в результате прохождения через ревербератор P; этот сигнал воспроизводится громкоговорителями, установленными с таким расчетом, чтобы их поле создавало впечатление «размытого» звучания с нелокализуемыми источниками. При некотором оптимальном соотношении уровней сигналов f_1 и f_2, выбранном в соответствии с характером воспроизводимой музыки, слушатель чувствует себя находящимся в акустической атмосфере хорошего концертного зала с присущей ему диффузной реверберацией. Именно поэтому квазистереофоническое воспроизведение высоко оценивается любителями музыки; с такой оценкой и связан термин квазистереофония (т. е. «почти стереофония»), предлагаемый для звуковых систем этого типа. Возможно, что создаваемый ими эффект переноса слушателя в первичное поле уступает по своей эстетической ценности квадрафоническому «звуковому окружению», зато он достигается несравненно более простыми техническими средствами.

Приведенный пример показывает, что среди систем со свободным доступом могут быть и такие, в которых доступ открыт на выходной, а не на входной стороне.

Два других примера относятся к функционально детермированным системам. В одном из них (рис. 20) используется линия задержки сигнала. Имея принятый моносигнал $\varphi(t)$ и запаздывающий на время τ сигнал $\varphi(t-\tau)$, полученный от линии задержки, можно путем синфазного и противофазного сложения получить два неизоморфных сигнала:

$$f_1 = \varphi(t) + \varphi(t-\tau), \qquad f_2 = \varphi(t) - \varphi(t-\tau)$$

(задержка τ должна лежать в интервале 50—150 мс). Как показывает опыт [Л. 33], воспринимаемый слушателем звуковой образ, локализуясь в целом в направлении громкоговорителей, расширяется, а создаваемое ими поле оставляет впечатление более или менее диффузного. Эффект связан, с одной стороны, с взаимным ослаблением противофазных составляющих сигналов f_1 и f_2 вблизи от оси симметрии системы, причем ослаблению подвергается в основном прямой звук и в гораздо меньшей степени диффузный. С другой стороны, фазовый сдвиг всех спектральных составляющих задержанного сигнала на один и тот же угол π эквивалентен временному сдвигу $\pi/\omega = 1/2f$, зависящему от частоты f ($\omega = 2\pi f$ — угловая частота составляющей). Вследствие этого различные составляющие спектра

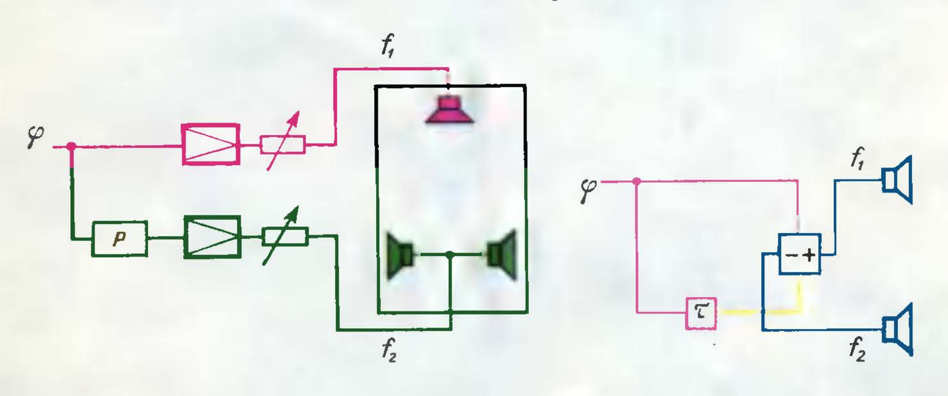


Рис. 19.

Рис. 20.

будут казаться приходящими из различных направлений, что и порождает иллюзию диффузности. Вместе с тем наличие синфазной части $\varphi(t)$ излучаемых сигналов f_1 и f_2 обеспечивает фронтальную «привязку» общей звуковой картины.

В качестве последнего примера назовем воспроизведение звука приемником с так называемым объемным звучанием. Эффект объемности достигается здесь благодаря применению фильтра верхних частот и соответствующим образом ориентированных (в частности, вынесенных) высокочастотных громкоговорителей, работающих совместно с основным широкополосным громкоговорителем. Высокочастотные излучатели должны быть расположены так, чтобы слушатели получали от них преимущественно отраженный, а не прямой звук; частоту разделения рекомендуется выбирать в области 300—500 Гц [Л. 33].

Технические приемы квазистереофонии находят применение в производстве грампластинок для модернизации монофонически сделанной записи в тех случаях, когда нет возможности сделать новую стереофоническую запись того же произведения с теми же исполнителями. Примерная схема изображена на рис. 21 [Л. 29]. Исходный сигнал $\varphi(t)$ распределяется сначала на восемь каналов, причем в каналах *I*, *II* и *III* вводятся задержки τ_1, τ_2 и τ_3 такие, что τ_2 превышает τ_1 примерно на 20 мс, а τ_3 на 20—30 мс больше, чем τ_2. После суммирования сигналов *II*, *III* и последующего синфазного и противофазного сложения с сигналом *I* получаются два неизоморфных сигнала:

$$I + (II + III) = \varphi(t - \tau_1) + \varphi(t - \tau_2) + \varphi(t - \tau_3)$$

и

$$I - (II + III) = \varphi(t - \tau_1) - \varphi(t - \tau_2) - \varphi(t - \tau_3),$$

подаваемые на два выходных канала перезаписи. В каналы *IV—VIII* вво-

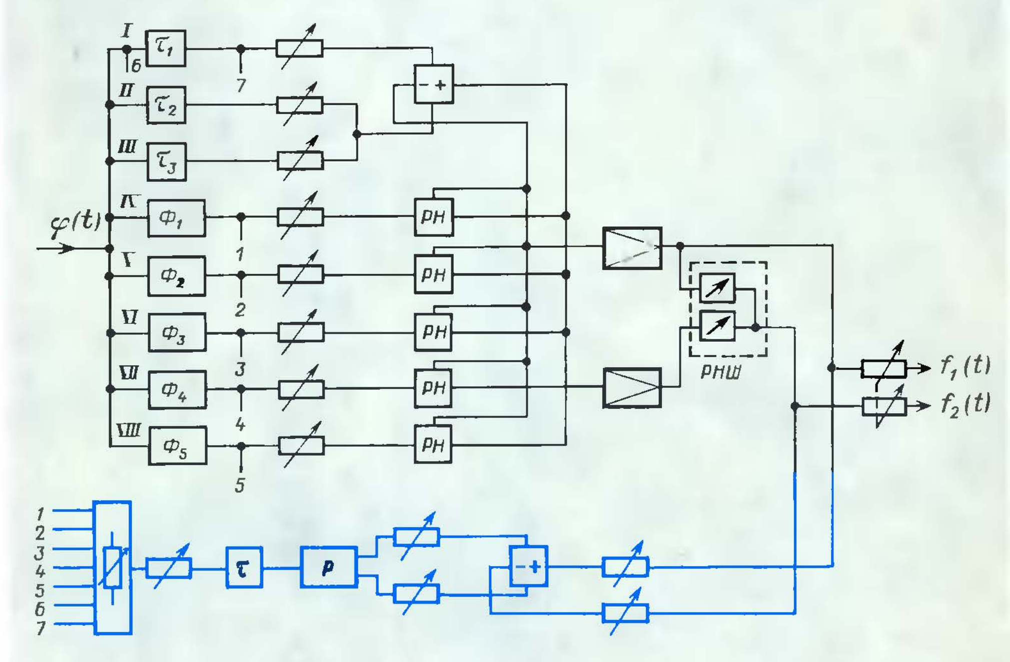


Рис. 21.

дятся фильтры (($Ф_1$ — $Ф_5$), выделяющие отдельные спектральные области, характерные для различных групп инструментов или солистов; регуляторы направления *РН* в этих каналах позволяют осуществить желаемое размещение кажущихся источников в воспроизводимой звуковой картине. Наконец, комбинируя сигналы, отводимые в точках *1—7* для обработки посредством реверберагора, можно, опять-таки используя синфазное и противофазное сложение, получить два некогерентных сигнала, подмешиваемых в выходные каналы перезаписи.

ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ

В замкнутых звуковых системах выходная и входная стороны совмещены и вопрос о взаимосвязи соответствующих сигналов требует уточненной постановки. Широко известным примером замкнутых систем являются системы звукоусиления: используемые в них микрофоны и громкоговорители работают в одной и той же ограниченной области пространства, т. е. в общем звуковом поле. Совмещение сторон звуковой системы обусловливает наличие электроакустической обратной связи, существенно ограничивающей возможность повышения уровня усиленного сигнала. Действительно, при любом размещении громкоговорителей и микрофонов всегда найдутся частоты, на которых обратная связь положительная; увеличение коэффициента до некоторого критического значения неизбежно приводит к самовозбуждению системы на какой-нибудь из этих частот.

Для повышения стабильности системы приходится принимать действенные меры к снижению уровня сигнала, создаваемого громкоговорителями в зоне размещения микрофонов. Поэтому можно считать, что если усиление не слишком близко к критическому, то действующее на микрофон звуковое давление в рабочих условиях практически не отличается от того. которое создали бы источники первичного сигнала при выключенном звукоусилении. Таким образом, это давление можно рассматривать как входной сигнал стабильно работающей системы; ее выходными сигналами будут подводимые к громкоговорителям напряжения. Тем самым замкнутая система приводится к общей схеме на рис. 7 с той лишь особенностью, что устройства *T* и *R* для преобразования и обработки сигналов сливаются здесь воедино.

Для усиления речи применяются, конечно, функционально детерминированные системы; их основной характеристикой является предельное усиление, которое может быть достигнуто при минимально необходимом запасе устойчивости.

Обозначим через μ коэффициент усиления напряжения в рабочем режиме, а через $\mu_{кр}$ — то значение μ, при котором система переходит в режим генерации. Относительная величина $\beta = \mu/\mu_{кр}$ (модуль коэффициента электроакустической обратной связи) характеризует запас устойчивости, обычно выражаемый в децибелах согласно формуле

$$\Delta = -20 \lg \beta. \qquad (11)$$

Для нормальной работы системы звукоусиления необходимо, чтобы запас устойчивости был достаточно велик — не ниже 2—3 дБ, в противном случае в усиленном сигнале будут отчетливо прослушиваться регенеративные искажения в форме тонального призвука, напоминающего звон. При работе системы в закрытом помещении этот эффект представляет собой процесс реверберации, избирательно замедленный на одной или нескольких из частот возможных автоколебаний. На рис. 22 показана теоретически

установленная зависимость времени замедленной реверберации T от коэффициента β электроакустической обратной связи [Л. 8]; T_0 есть собственное время реверберации помещения. Как видно из графика, при малом запасе устойчивости ($\Delta < 3$ дБ) регенерация сигнала заметно возмущает нормальный ход процесса реверберации.

Оставляя в стороне вопрос о локальной оценке эффективности звукоусиления в той или иной части озвученной площади, можно характеризовать работу системы коэффициентом усиления мощности — отношением акустических мощностей, излучаемых громкоговорителями и источником первичного сигнала при заданном запасе устойчивости [Л. 15].

Значительно больший принципиальный интерес представляют замкнутые системы со свободным доступом. Это — многоканальные системы усиления концертных программ в больших залах универсального назначения и вместе с тем системы оперативного управления акустикой зала; такие системы получили название а м б и о ф о н и ч е с к и х. Первым выдающимся примером явились звуковые системы большого зала (6 000 мест) Кремлевского Дворца съездов в Москве. Зал был введен в эксплуатацию в 1961 г. За истекшее с тех пор время системы аналогичного типа были осуществлены в Ташкенте (Дворец искусств, 2 500 мест), в Киеве (киноконцертный зал, 4 000 мест), в Ленинграде (Октябрьский зал, 2 500 мест) и в некоторых других городах Советского Союза. Далее звуковые системы Кремлевского Дворца съездов будут описаны достаточно подробно. Здесь ограничимся лишь рассмотрением некоторых вопросов, относящихся к электроакустической обратной связи в многоканальных замкнутых системах.

В таких системах наряду с основными связями, действующими в каждом из каналов в отдельности, возникают еще и перекрестные обратные связи, петли которых замыкаются через несколько каналов. Сущность дела легко понять на простейшем примере двухканальной системы (рис. 23). Здесь основные связи обусловлены действием громкоговорителей каждого из двух каналов на микрофон того же самого канала; перекрестная связь возникает вследствие взаимодействия каналов, так как на микрофон каж-

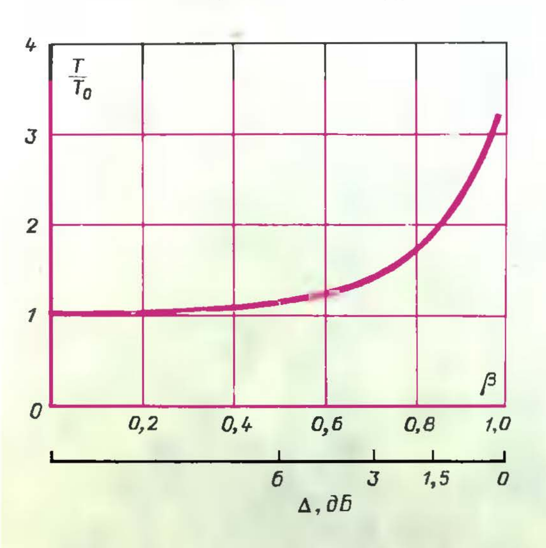


Рис. 22.

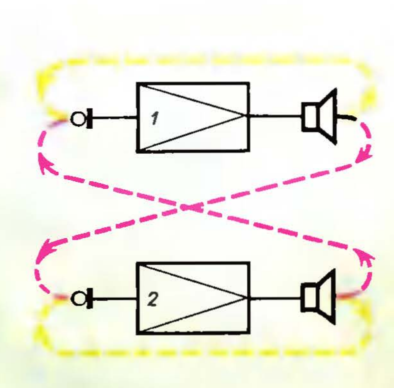


Рис. 23.

дого из них действует сигнал, приходящий от громкоговорителя другого канала. Символическое изображение трех петель обратной связи в двухканальной системе дано на рис. 24, *а*, где символы *М* и *Г* означают микрофон и громкоговоритель канала, номер которого указан индексом. Еще сложнее случай трехканальной системы (рис. 24, *б*): здесь к трем основным связям (условимся называть их связями первого порядка) добавляются три перекрестных связи, обусловленные взаимодействием той или иной пары каналов (связи второго порядка) и одна связь третьего порядка, в которой участвуют все три канала.

Нетрудно видеть, что в N-канальной системе число обратных связей порядка n равно C_N^n — числу сочетаний из N элементов по n, а общее число всех связей равно:

Рис. 24.

$$\nu = \sum_{n=1}^{N} C_N^n = \sum_{n=1}^{N} \frac{N!}{n!(N-n)!}. \tag{12}$$

Так, например, при переходе от двух каналов к пяти общее число обратных связей возрастает с 3 до 31.

Запас устойчивости замкнутой многоканальной системы, работающей в закрытом помещении, может быть теоретически вычислен для случая, когда сигналы, действующие на каждый из микрофонов со стороны громкоговорителей, некогерентны и когда электроакустические обратные связи осуществляются через диффузное поле, а не через прямой звук [Л. 17] В этом случае условие устойчивости приобретает вид:

$$\sum_{i=1}^{N} \beta_i^2 < 1, \tag{13}$$

где β_i есть модуль коэффициента обратной связи в i-м канале. Запас устойчивости определяется выражением

$$\Delta = -10 \lg \sum_{i=1}^{N} \beta_i^2, \tag{14}$$

откуда формула (11) получается как частный случай.

Заметим, что без учета перекрестных обратных связей можно бы прийти к явно ошибочному выводу, что устойчивость работы каждого из каналов в отдельности ($\beta_i < 1$ для любого i) гарантирует устойчивость системы при совместной работе всех каналов.

Конечно, эффективность многоканальных систем усиления и амбиофонии определяются прежде всего возможностями звукорежиссерской обработки входных сигналов. Нельзя, однако, забывать о том, что эти возможности ограничены условием устойчивости (13), которое здесь имеет еще более важное значение, чем для одноканальных систем усиления речи.

7. ДИОТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА

Схема диотической передачи представлена на рис. 25. Прием звука осуществляется двумя микрофонами $M_п$ и $M_л$ искусственной головы *ИГ*, представляющей собой модель человеческой головы в масштабе 1 : 1. Сигналы $f_п$ и $f_л$, принимаемые в первичном звуковом поле, являются более или менее точными копиями тех, которые были бы приняты ушами слушателя, если бы он занимал место *ИГ*. Эти же самые сигналы, переданные по отдельным каналам и подведенные к телефонам $T_п$ и $T_л$ на ушах слушателя, должны создавать для него максимально убедительную иллюзию переноса в первичное поле, если только аппаратура и каналы обладают достаточно высоким качеством.

Небезынтересно упомянуть, что еще в 1881 г. система, аналогичная диотической, демонстрировалась на Всемирной выставке в Париже. С помощью телефонов посетители могли слушать передачу из оперного театра, проводившуюся по двум телефонным линиям. Однако прием звука осуществлялся не микрофонами в макете головы, а двумя группами микрофонов, стоявших справа и слева от сцены.

До сравнительно недавнего времени диотическая передача представлялась идеалом стереофонии, хотя способ ее технической реализации казался лишенным практического интереса. Напротив, сейчас она приобретает определенное значение в качестве средства, позволяющего организовать сравнительную субъективную оценку условий слышимости и качества звучания музыки в различных концертных залах. Вместе с тем выяснилось, что доведение диотической системы до уровня, достаточно близкого к идеалу, оказывается далеко не столь простой задачей, как предполагалось. Дело в том, что при диотическом воспроизведении звуковой образ нередко локализуется скорее внутри головы слушателя, нежели вне ее.

Эффект локализации внутри головы (ЛВГ) до сих пор еще не получил достаточно полного объяснения. Первоначально предполагалось, что ЛВГ может быть обусловлена неподвижностью макета головы в первичном поле, неидентичностью двух сквозных (от микрофона до телефона) каналов или недостаточно высоким их качеством. Опыты В. Ширмера [Л. 44] позволили исключить первый из указанных факторов: в работе В. Рейхардта и Б. Гауштейна [Л. 41] была доказана невозможность связать ЛВГ с несовершенством и неидентичностью каналов. Действительно эффект наблюдался даже и тогда, когда расхождение характеристик двух высококачественных каналов не превышало 3 дБ в полосе от 100 до 2 000 Гц, а при более высоких частотах (до 15 кГц) не выходило за пределы 0,5 дБ. При сигнале в виде терцполосы шума, лежащей в диапа-

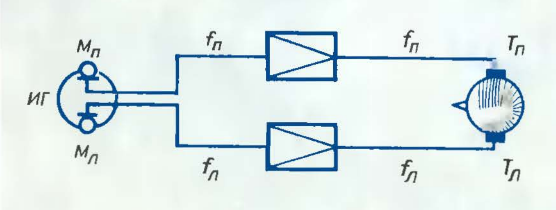


Рис. 25.

зоне от 3 до 7 кГц, где характеристики каналов различались не более чем на 0,2 дБ, эффект ЛВГ неизменно сохранялся.

Рейхардт и Гауштейн обнаружили интересную связь между ЛВГ и кажущимся возвышением виртуального источника при двухканальном воспроизведении звука громкоговорителями, симметрично расположенными относительно слушателя. Если два громкоговорителя, удаленных на расстояние порядка нескольких метров, излучают равногромкие и в достаточной мере когерентные сигналы, то слушатель локализует источник звука прямо перед собой и несколько выше линии базы громкоговорителей. С возрастанием угловой ширины базы в результате приближения к ней слушателя кажущийся источник перемещается вверх, и когда, наконец, слушатель оказывается в середине базы, т. е. между двумя обращенными к нему громкоговорителями, звуковой образ представляется ему широко расплывшимся и локализованным где-то на потолке. Если теперь приближать громкоговорители к слушателю, сохраняющему центральное положение, то кажущаяся высота источника уменьшается до тех пор, пока при непосредственной близости громкоговорителей к ушам (однако без контакта) источник не «входит в голову».

Высокая степень взаимной корреляции сигналов, принимаемых ушами при диотической передаче, является хотя и достаточным, но отнюдь не необходимым условием эффекта ЛВГ. В частности, при прослушивании посредством наушных телефонов обычных двухканальных записей, сделанных звукорежиссером с соблюдением эстетических требований к звучанию стереофонически воспроизводимой музыки, звуковой образ не локализуется во внешнем пространстве, хотя отдельные его компоненты могут, оставаясь внутри головы, смещаться в сторону одного или другого уха. Вместе с тем при высоком художественном уровне звукорежиссуры канальные сигналы, как правило, некогерентны. Сигналы, принимаемые микрофонами при диотической передаче из закрытых помещений, также будут некогерентными, если только макет головы находится в зоне преобладания диффузного звука; тем не менее при прослушивании через телефоны звуковой образ уверенно проецируется вовне и эффект ЛВГ отсутствует.

В гл. 4 будем иметь случай говорить о мерах, позволяющих устранить эффект ЛВГ при практическом использовании диотической системы.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИРОДА СТЕРЕОФОНИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

8. ЛОКАЛИЗАЦИЯ КАЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Вопрос о природе и составе стереофонического эффекта, неоднократно обсуждавшийся как на профессиональном уровне, так и дилетантами, все еще продолжает оставаться дискуссионным. Широко распространенная точка зрения может быть сформулирована следующим образом. Стереофоническая передача объективно отличается от монофонии сохранением некоторой части информации о положении и размещении первичных источников звука. При воспроизведении музыки эта информация сама по себе быть может и не представляет эстетической ценности; однако ее наличие влечет за собой такое новое качество звучания, которое, хотя и не поддается однозначному объективному описанию, тем не менее обеспечивает стерео-

фонии бесспорное предпочтение по сравнению с монофонической передачей тех же самых музыкальных произведений.

Такая точка зрения, выбранная, как убедимся позднее, не наилучшим образом, открывает простую и удобную возможность изучения и сравнительной оценки стереофонических систем. Метод исследования сводится к индикации направлений на невидимый источник воспроизводимого звука в тех или иных условиях передачи сигнала. Оценка качества исследуемой системы предположительно связывается с количественной мерой точности слуховой пеленгации источников. Именно этим и объясняется тот факт, что в технической литературе можно найти немало работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию стереофонической передачи информации о положении первичного источника звука на входной стороне двухканальной системы. В качестве испытательных сигналов обычно выбираются синусоидальные тоны различных частот, полосы шума и речь. При исследовании предпочтительности стереофонии используются, конечно, музыкальные звучания.

Необходимо подчеркнуть, что в большинстве опубликованных работ, в особенности относящихся к начальному этапу исследований в области стереофонии, объектом изучения служила весьма упрощенная модель двухканальной системы, характеризующаяся тем, что передаваемые по ней сигналы, оставаясь изоморфными, различались лишь уровнем и (или) положением на оси времени. Выбор этой модели, по-видимому, связан с молчаливо подразумеваемым толкованием двухканальной передачи как имитации или моделирования бинаурального эффекта — способности человека определять направление на источник звука благодаря разности уровней и разного времени прихода сигналов, принимаемых двумя ушами. При таком подходе отпадает даже и надобность в сквозной системе передачи; для реализации модели достаточно иметь два разнесенных громкоговорителя и подводить к ним сигналы от одного и того же источника с раздельно регулируемыми уровнями и возможностью создания временного сдвига.

Исследование локализации кажущегося источника звука с использованием этой модели началось в 1940 г. работой К. де Бура [Л. 22]. Экспериментальная ее часть была выполнена на установке с двумя громкоговорителями, отстоящими на расстоянии $b = 3{,}5$ м друг от друга и излучающими один и тот же сигнал, но в общем случае с различными уровнями или со сдвигом во времени (рис. 26). Громкоговорители закрывались от слушателей легким занавесом, перед которым находилась шкала с тем, чтобы слушатель мог указать направление на кажущийся источник выбором соответствующей точки на шкале.

На рис. 27 изображена экспериментально установленная зависимость углового смещения источника от разности уровней изоморфных канальных сигналов в условиях, когда слушатель находится на оси симметрии воспроизводящей системы. При равных уровнях источник локализуется в центре базы, т. е. на равных расстояниях от громкоговорителей; при наличии разности уровней источник смещается в сторону громкоговорителя, излучающего более интенсивный сигнал. Исследование зависимости смещения от временного сдвига между сигналами показало, что сдвиг, необходимый для предельного смещения, т. е. до совпадения кажущегося источника с громкоговорителем, излучающим опережающий сигнал, значительно превышает величину, соответствующую максимальной разности ходов при непосредственном бинауральном восприятии, когда принимаемые ушами волны различаются по времени прихода всего лишь на 0,6 мс. Наиболее интересным результатом явилось открытие «взаимозаменяемости»

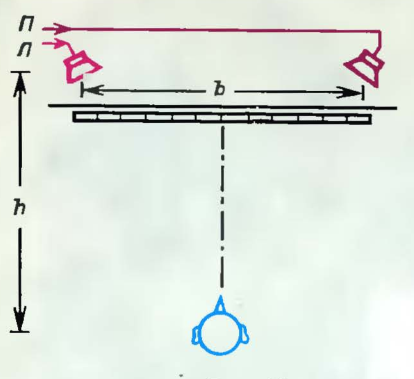


Рис. 26.

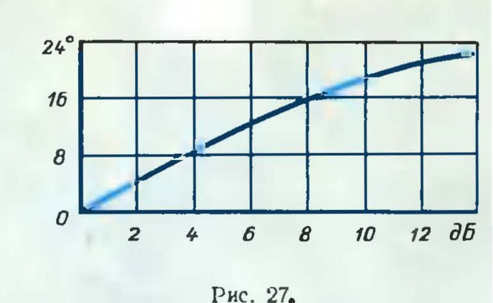


Рис. 27.

сдвига во времени и разности уровней сигналов: оказалось, что в известных пределах одно и то же смещение звукового образа может быть достигнуто либо разностью уровней, либо сдвигом канальных сигналов во времени согласно соотношению, представленному на рис. 28.

Опыты К. де Бура показали, что если слушатель смещается в сторону от оси симметрии системы, то локализация становится при небольших смещениях неточной, а при более значительных грубо ошибочной.

Работа Д. Ликея [Л. 36], опубликованная двумя десятилетиями позднее, интересна прежде всего организацией эксперимента. Модель двухканальной системы (рис. 29) с двумя направленными на слушателя громкоговорителями имела базу $b = 3$ м. Между громкоговорителями стереокомплекта A и B, т. е. вдоль базы, на разных интервалах были расставлены реперные громкоговорители (репером принято называть знак, устанавливаемый в качестве ориентира при выполнении геодезических работ или в процессе пристрелки огнестрельного оружия). При любых значениях разности уровней канальных сигналов эффективное звуковсе давление в занимаемой слушателем точке поддерживалось неизменным (0,02 Па).

В ходе исследований, проводившихся на открытом воздухе с тем, чтобы исключить влияние отражений и реверберации, испытательный сигнал подавался сначала на какой-либо из 7 реперных громкоговорителей. Через несколько секунд этот сигнал плавно, без щелчка, переключался на гром-

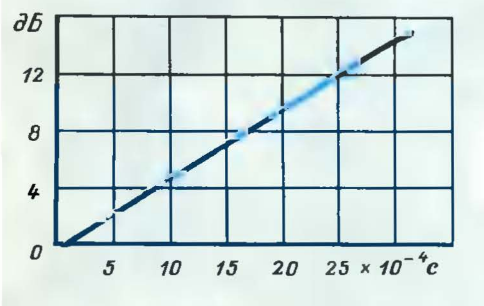


Рис. 28.

Рис. 29.

когооворители стереокомплекта при некоторой определенной разности канальных уровней. Слушатель должен был ответить на вопрос о том, куда — вправо или влево — сместился кажущийся источник после переключения. В более или менее случайной последовательности та же процедура повторялась для различных комбинаций уровней и для разных реперных громкоговорителей. Обозначим через B/A разность уровней правого и левого сигналов, считая ее положительной — при $B > A$; в большинстве случаев изменение на ± 2 дБ оказывалось достаточным для полной согласованности ответов слушателей (от 4 до 12 человек). Если разброс значений B/A, соответствующих включению одного и того же реперного громкоговорителя, превышал 2 дБ, то по графику распределения выбиралось такое значение B/A, при котором в 50% случаев указывалось смещение кажущегося источника в сторону громкоговорителя, излучающего более интенсивный сигнал. Интересно, что Ликей отказывался от закрытия громкоговорителей занавесом, поскольку наличие или отсутствие занавеса никак не сказывалось на ответах слушателей.

Преимущества описанной методики связаны, во-первых, с тем, что от слушателей не требуется указания какой-либо определенной точки на визуально наблюдаемой шкале, т. е. координации зрительного и слухового образов. Во-вторых, ответ слушателя определяется простейшим выбором одной из двух возможностей («вправо» или «влево»).

На рис. 30 представлены некоторые из полученных результатов. На всех графиках абсциссы указывают разности уровней канальных сигналов (B/A), а ординаты — номер того из реперных громкоговорителей, положение которого соответствует направлению на кажущийся источник, каким оно представляется согласно показаниям слушателей. Кривая на рис. 30, *а* определена на речевом сигнале при симметричном расположении громкоговорителей относительно слушателя. Получающиеся при этом зна-

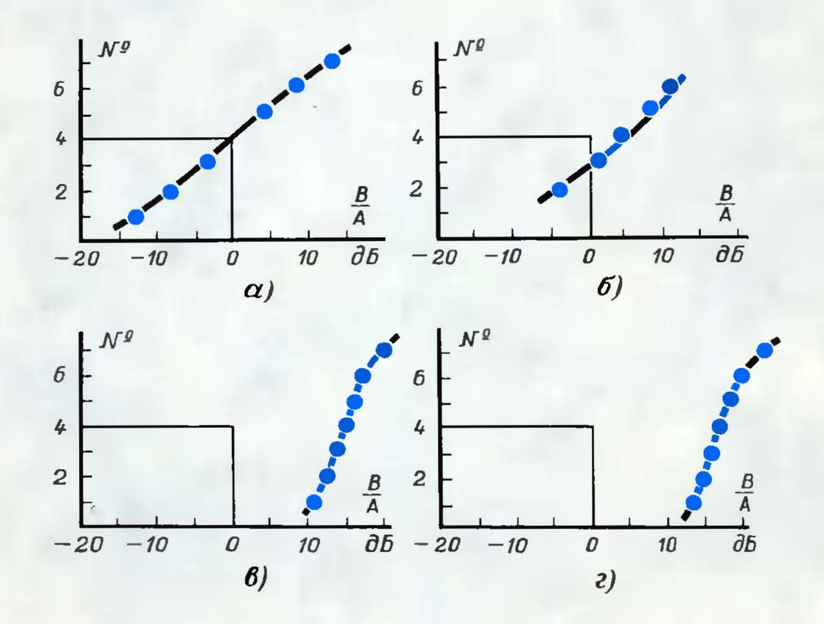


Рис. 30.

чения B/A имеют очень небольшой разброс, что свидетельствует о вполне уверенной локализации. Остальные кривые иллюстрируют роль смещения слушателя влево от оси симметрии на 7,5 см (рис. 30, *б*), на 0,75 м (рис. 30, *в*) и на 1,5 м (рис. 30, *г*). Как видно из приводимых данных, даже небольшое смещение приводит к заметному искажению акустической перспективы; кроме того, при больших смещениях разброс значений B/A сильно возрастает, а это значит, что локализация источника становится неуверенной.

На рис. 31 представлен эффект временнóго сдвига канальных сигналов. По своему характеру этот эффект не отличается от эффекта смещения слушателя в сторону от оси симметрии, поскольку в последнем случае также появляется временнóй сдвиг между сигналами, приходящими от громкоговорителей. Количественное сравнение обоих эффектов осложняется тем, что внеосевое положение слушателя сопровождается появлением добавочной разности уровней.

Не приводя здесь других экспериментальных данных Ликея, заметим, что они сопоставлялись с результатами расчета на основании теории интераурального временного сдвига, зависящего не только от разности времен прихода сигналов к ушам, но и от разности уровней сигналов. Теория Ликея исходит из предположения, что два сигнала от громкоговорителей, принимаемые каждым ухом («прямой» и «обходной», рис. 32), эквивалентны одному, приходящему по некоторому определенному направлению от одного единственного источника.

В области низких частот результанта складывающихся сигналов определяется просто. Так, например, сигнал, принимаемый левым ухом от громкоговорителей стереокомплекта, есть сумма

$$S_L = A_L f(t) + B_L f(t - T),$$

где A_L и B_L — амплитуды; T — запаздывание обходного сигнала относительно прямого при осевом положении слушателя. Используя разложение

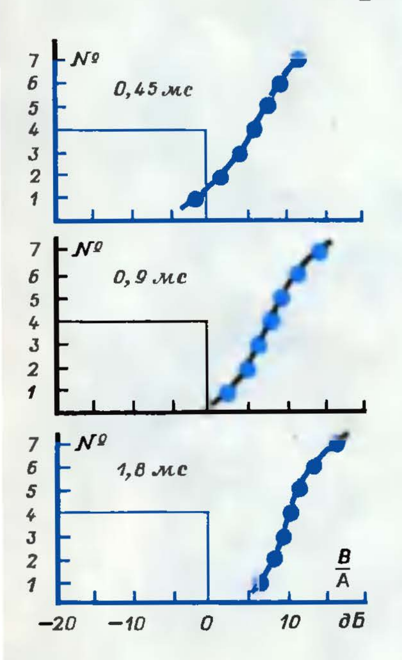


Рис. 31.

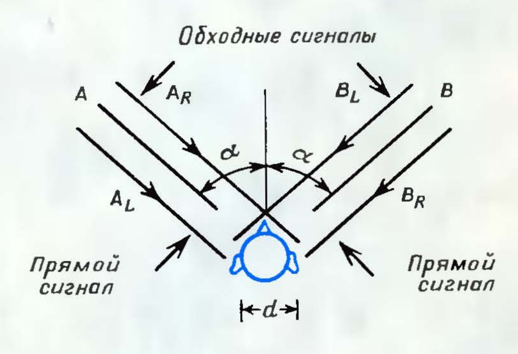


Рис. 32.

по степеням T, напишем:

$$S_L = A_L f(t) + B_L f(t) - B_L T f'(t) + \frac{B_L T^2}{2} f''(t) - \ldots$$

Пренебрегая членами второго и более высоких порядков, имеем:

$$S_L = (A_L + B_L)\left[f(t) - \frac{B_L T}{A + B_L} f'(t)\right].$$

Заметим теперь, что выражение в квадратных скобках совпадает с первыми двумя членами разложения функции

$$f(t - B_L T/(A_L + B_L))$$

в ряд Тейлора, поэтому можно написать:

$$S_L = (A_L + B_L) f\left(t - \frac{B_L T}{A_L + B_L}\right) = (A_L + B_L) f(t - T_L), \tag{15}$$

где

$$T_L = B_L T/(A_L + B_L).$$

Подобным же образом сумма сигналов, принимаемых правым ухом, приводится к виду

$$S_R = (A_R + B_R) f(t - T_R), \tag{16}$$

где

$$T_R = A_R T/(A_R + B_R).$$

Интерауральный временной сдвиг, т. е. сдвиг во времени результирующих сигналов (15) и (16), получается равным:

$$T_s = T_R - T_L = \frac{A - B}{A + B} T = \frac{A - B}{A + B} \frac{d}{c} \sin\alpha, \tag{17}$$

где d — диаметр головы; c — скорость звука; 2α — угловая ширина базы громкоговорителей; в целях упрощения принято, что $A_L = A_R = A$ и $B_R = B_L = B$, т. е. ослабление обходных сигналов вследствие дифракции вокруг головы, при низких частотах незначительное, оставлено без учета.

Если справедлива гипотеза, согласно которой пеленг на источник с азимутом φ определяется соответствующим интерауральным сдвигом T_s, то опыт должен подтвердить соотношение

$$\sin\varphi = \frac{c}{d} T_s = \frac{A - B}{A + B} \sin\alpha. \tag{18}$$

В применении к высокочастотному сигналу компоненты результанты, принимаемой левым ухом, можно записать в виде $A_L\, g(t)$ и $B_L\, g(t)$, где неотрицательная функция $g(t)$, медленно меняющаяся во времени, приближенно отображает огибающую сигнальной функции. Предполагая некогерентное сложение огибающих, можно представить его результат выражением

$$\overline{S}_L^2 = A_L^2 g^2(t) + B_L^2 g^2(t - T).$$

Разлагая $g^2(t - T)$ в ряд и отбрасывая слагаемые второго и более высоких порядков, получаем:

$$\overline{S}_L^2 = A_L^2 g^2(t) + B_L^2 g^2(t) - 2B_L^2 T g(t) g'(t) = (A_L^2 + B_L^2)\left[g^2(t) - \frac{2B_L^2 T}{A_L^2 + B_L^2} \times g(t) g'(t)\right].$$

Так как выражение в квадратных скобках совпадает с первыми двумя членами разложения функции

$$g^2\left[t-B_L^2T/\left(A_L^2+B_L^2\right)\right]$$

в ряд Тейлора, то можно написать:

$$\overline{S}_L^2=\left(A_L^2+B_L^2\right)g^2(t-T_L),$$

где

$$T_L=\frac{B_L^2}{A_L^2+B_L^2}T=\frac{m^2B^2}{A^2+m^2B^2}T,$$

причем коэффициент $m<1$ учитывает ослабление обходного сигнала в результате огибания головы. Аналогичным образом для результанты, принимаемой правым ухом, получим:

$$T_R=\frac{m^2A^2}{m^2A^2+B^2}T.$$

Таким образом, интерауральный временно́й сдвиг получается равным:

$$T_s=T_R-T_L=\frac{m^2(A^4-B^4)}{(A^2+m^2B^2)(m^2A^2+B^2)} \qquad (19)$$

и пеленг на кажущийся источник должен удовлетворять условию

$$\sin\varphi=\frac{m^2(A^4-B^4)}{(A^2+m^2B^2)(m^2A^2+B^2)}\sin\alpha. \qquad (20)$$

Ликей приводит данные, подтверждающие хорошее согласие экспериментальных данных с развитой им теорией интерaурального сдвига.

Взаимозаменяемость разности уровней и сдвига во времени — факт, который, по-видимому, может получить объяснение на основе этой теории — проливает свет на возможность расширения зоны качественно правильной локализации путем воздействия на характеристики направленности громкоговорителей двухканальной системы. Границы этой зоны принято определять максимально допустимой ошибкой локализации центра базы при равных уровнях канальных сигналов; эта погрешность, выраженная через ширину базы, не должна превышать величины порядка $b/6$.

Смещение слушателя в сторону от оси симметрии приводит к появлению временно́го сдвига, обусловленного уменьшением расстояния до одного из громкоговорителей и его увеличением до другого; это изменение, как правило, сопровождается повышением уровня N_A опережающего сигнала от ближайшего громкоговорителя и снижением уровня N_B запаздывающего сигнала. При этом кажущийся источник звука смещается из центра базы в том же направлении, как и слушатель. Правильная локализация центра может быть восстановлена, если диаграммы направленности громкоговорителей и их ориентация таковы, что при смещении в сторону громкоговорителя A уровень N_A снижается, а не возрастает, тогда как уровень N_B, напротив, повышается. Как показал опыт, для удовлетворительной компенсации эффекта бокового смещения слушателя достаточно обеспечить требуемые характеристики направленности лишь в области средних частот.

В качестве примеров отметим две технические реализации этого приема, различающиеся способом достижения желаемых изменений уровней N_A и N_B при боковом смещении. Один из способов предложен В. Кулем

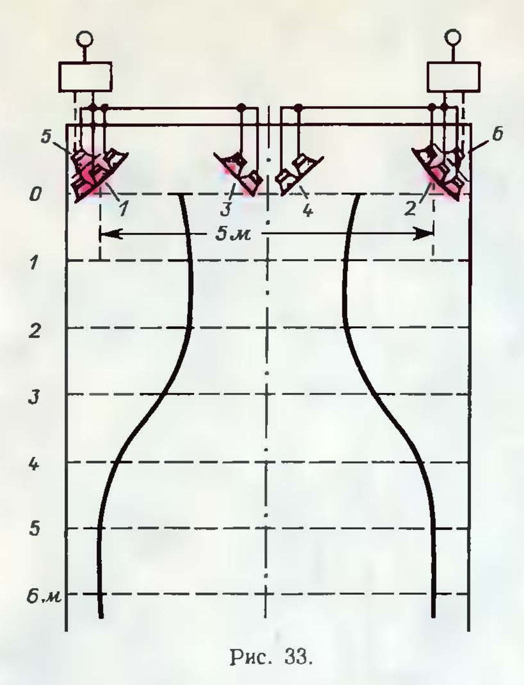
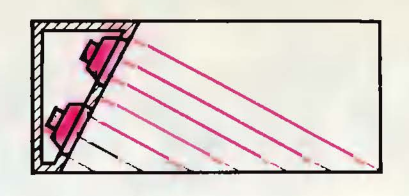


Рис. 33.


Рис. 34.

[Л. 34]. Здесь используются двухполосные громкоговорители, в каждом из которых звено, воспроизводящее средние и высокие частоты, представлено двумя параллельно включенными группами излучателей; одна из них (*1* или *2* на рис. 33) совмещена с низкочастотным звеном (*5* или *6*), другая (*3* или *4*) находится вблизи от центра базы. Оси двух центральных групп несколько развернуты в стороны от средней линии. Зона допустимых смещений при $b = 5$ м имеет ширину 2,4 м на расстоянии 1 м от базы и расширяется до 5 м при удалении на 5 м и более. Для сравнения приводятся цифры, относящиеся к системе с обычными громкоговорителями и базой 3 м: ширина зоны допустимой погрешности локализаци центра составляет 12 см на расстоянии 1 м от базы, 21 см при удалении на 3 м и 38 см на расстояниях 5 м и более. Другой способ, предложенный А. В. Борисенко [Л. 2], приводит к желаемым результатам благодаря использованию акустических линз, поворачивающих диаграмму направленности среднечастотных звеньев трехполосных громкоговорителей в сторону оси симметрии системы (рис. 34).

9. ЛОКАЛИЗАЦИЯ, ОБСТАНОВКА, ОКРУЖЕНИЕ

Условие изоморфизма канальных сигналов удовлетворяется, строго говоря, лишь в том случае, когда на входной стороне системы имеется один-единственный источник звука, излучающий в неограниченной среде. При наличии нескольких распределенных источников принимаемые микрофонами сигналы могут оказаться существенно неизоморфными. Кроме того, если источник первичного сигнала, пусть даже единственный, работает в реверберирующем помещении, то временные структуры отражений, принимаемых разнесенными микрофонами, не совпадут и канальные сигналы будут отличаться друг от друга, несмотря на совпадение составляющих, соответствующих прямому звуку. Поэтому результаты описанных исследований имеют ограниченную значимость и требуют дополнений, основанных на более реальном учете условий стереофонической передачи.

Одной из первых работ, проведенных в этом направлении, является работа Дж. Лохнера и В. Кета [Л. 37], которые установили наличие по меньшей мере двух составляющих стереофонического эффекта: разделение сигналов по направлению их прихода и звуковую обстановку.

В одном из поставленных ими опытов запись солирующего кларнета по двухканальной системе *AB* была сделана в заглушенной камере и в небольшой студии с временем реверберации 0,5 с. В обоих случаях солист находился на равном расстоянии от микрофонов. Записи воспроизводились затем в заглушенной камере двумя громкоговорителями с базой 3 м. При воспроизведении записи, сделанной в студии, исполнитель казался находящимся позади базы, т. е. отодвинутым в глубину; для слушателя на оси симметрии воспроизводящей системы источник звука локализовался в направлении центра базы. Если слушатель двигался параллельно базе на расстоянии 3 м от нее, то кажущийся источник смещался в том же направлении. При прослушивании записи, сделанной в заглушенном помещении, исполнитель локализовался в центре базы, однако без эффекта углубления; но даже и при небольшом боковом смещении слушателя источник скачком перебрасывался к более близкому громкоговорителю. Нельзя не заметить, что точно такой же результат получился бы при моносигнале и параллельном соединении громкоговорителей.

Описанный опыт убедительно иллюстрируют роль реверберации в помещении, откуда ведется передача. Даже если время реверберации невелико, нарушение изоморфизма канальных сигналов, обусловленное различиями временной структуры отражений, является необходимым условием полноценного стереофонического эффекта, менее зависящего от положения слушателя, чем эффект локализации кажущегося источника звука.

Необходимость разграничения двух признаков, отличающих стереофонию от монофонической передачи, подтверждается сравнением стереофонического звучания с квазистереофоническим, не содержащим информации о размещении первичных источников и способным представить стереофонию без локализации.

В опытах, восстановленных Лохнером и Кетом, звуковым материалом служили записи оркестровой музыки, исполнявшейся в концертном зале. Запись делалась стереофонически по системе *AB* с двумя ненаправленными микрофонами на расстоянии 3,7 м друг от друга и в 5 м от оркестра. Стереофоническое и сравниваемое с ним квазистереофоническое воспроизведение через одни и те же громкоговорители осуществлялось в заглушенном помещении с площадью 25 м^2. Как видно из схемы (рис. 35), сигналы φ_1 и φ_2, воспроизводимые с двух дорожек магнитной фонограммы, воспроизводились стереофонически, если переключатель во втором канале находился в положении *S*. В квазистереофоническом варианте (переключатель в положении *Q*) использовалась только одна из дорожек, несущая сигнал φ_1. Второй сигнал получался путем воспроизведения первого в небольшой студии, причем микрофон, отстоящий на 3 м от громкоговорителя (что соответствует времени пробега 9 мс), вырабатывал после надлежащего усиления сигнал, не совпадающий с тем, который подводился к громкоговорителю в студии. Так как время реверберации в студии значительно меньше, чем в концертном зале, то ее влияние на сигнал φ_1 нельзя считать эффектом искусственной реверберации; основное значение нужно приписать декорреляции воспроизводимых сигналов в результате смещения во времени и влиянию характеристики студийного канала (от зажимов громкоговорителя до выхода микрофонного усилителя).

Важнейшим результатом прослушиваний, проводившихся с участием 25 экспертов, явилось установление того факта, что при внеосевом положении слушателя стереофоническое и квазистереофоническое звучание практически неразличимы. Действительно, при испытании на различимость (по схеме *ABX*, см. § 2) числа правильных и ошибочных отождеств-

лений составили 13 и 12 соответственно; это значит, что ответы слушателей были по существу дела гадательными. При сравнении качества звучания 12 человек предпочли стереофонию, 13 высказались в пользу квазистереофонической передачи. На рис. 36 крестиками отмечены кажущиеся положения центра оркестра в двух сопоставляющихся вариантах (*S* и *Q*); расходящиеся из точки наблюдения прямые определяют угловую ширину воспринимаемого звукового образа.

Комментируя результаты своей работы, Лохнер и Кет утверждают, что передача звуковой обстановки играет более важную роль в создании полноценного стереофонического звучания музыки, чем разделение сигналов по кажущемуся направлению прихода к слушателю. В той или иной форме это мнение было поддержано и другими исследователями, занимавшимися проблемой эстетической оценки стереофонии.

Звуковая обстановка становится фактором первостепенного значения, когда она воплощается в диффузном поле с нелокализуемыми источниками, иначе говоря, становится звуковым окружением. Как уже отмечалось (см. § 6), двухканальная стереофония допускает выбор одного из двух способов разделения первичной звуковой информации; традиционным стало ее деление на «правую» и «левую», тогда как раздельная передача составляющих, связанных с прямым звуком и с диффузным полем, в течение длительного времени осталась хотя и интересной, но практически не используемой возможностью.

Сравнительную оценку этих двух видов стереофонии можно найти в работе Т. Корна [Л. 32], посвященной вопросу об оптимальном использовании двух каналов стереофонической передачи. Двухканальная запись симфонической музыки была сделана автором в большом зале Дворца искусств в Брюсселе во время оркестровой репетиции; воспроизведение происходило в сравнительно небольшом (80 м³) помещении с участием 20 экспертов. Звуковая система в целом соответствовала схеме на рис. 9, *б* с той лишь разницей, что для воспроизведения прямого звука был использован только один громкоговоритель.

Сначала слушателям было предъявлено звучание сигнала, переданного по каналу *A* (прямой звук) при выключенном канале *B* (диффузный звук). Слушатели оценили звучание как удовлетворительное, отметив при этом «точечную» локализацию звукового образа в направлении единственного работающего громкоговорителя. При включении канала *B* слушатели почувствовали себя внезапно перенесенными в большой зал; наряду с

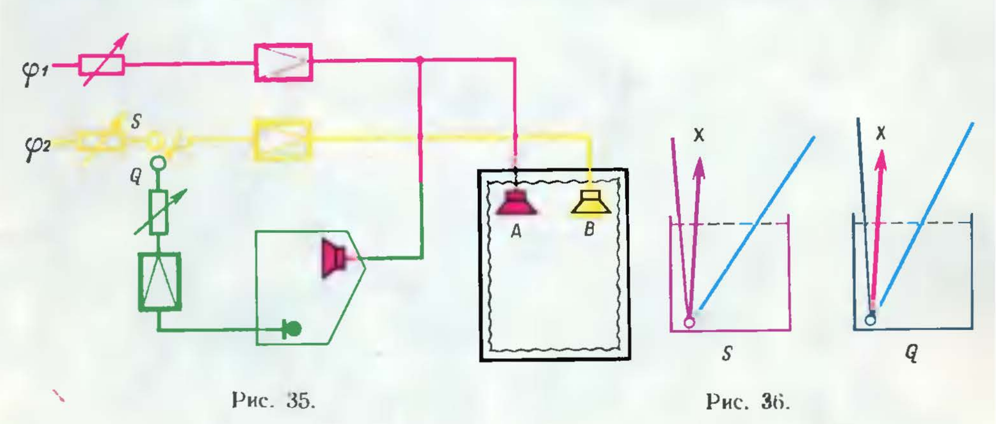


Рис. 35. Рис. 36.

этим они отметили, что звуковой образ вышел из «громкоговорителя» и распределился на широкой эстраде. Когда после этого канал *B* был снова выключен, звучание, передаваемое только по каналу *A*, произвело впечатление очень обедненного. Эффект мгновенного стяжения инструментов оркестра в одну точку был охарактеризован как «комический».

Вслед за этим слушателям было предъявлено звучание того же оркестра, стереофонически записанного в условиях общепринятого деления информации на «правую» и «левую». Те же слушатели, отмечая уверенную раздельную локализацию источников звука, в то же время констатировали утрату иллюзии переноса в акустическую атмосферу большого концертного зала. Общая сравнительная оценка двух видов разделения первичной информации сводилась к предпочтению раздельной передачи прямой и диффузной составляющей, если только последняя воспроизводится распределенной системой громкоговорителей. Этот вариант Корн и считает оптимальным использованием двух стереоканалов.

10. УСЛОВИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЯ СТЕРЕОФОНИИ

На ранних этапах исследования стереофонического эффекта системы типа *AB* и *XY* считались достаточно представительными моделями реальных звуковых систем, выбираемых для передачи музыки. Вместе с тем приемы режиссерской обработки первичной звуковой информации со все более широким использованием полимикрофонной техники развивались в направлении постепенного расширения возможностей свободного доступа. Этим и объясняется тот факт, что искусство звукорежиссуры совершенствовалось вне связи с результатами продолжавшегося изучения законов локализации источников на выходной стороне функционально детерминированных систем.

Неустранимое влияние звукорежиссуры и роль эстетической организации первичного звукового материала были (как кажется, впервые) учтены в работе Г. С. Гензеля и его сотрудников [Л. 5]. Работа имела своей задачей количественную оценку предпочтительности стереофонического звучания в ее зависимости от места слушателя, от типа и базы воспроизводящего устройства; кроме того, были установлены и некоторые закономерности, относящиеся к способности локализации отдельных источников в составе звучащего ансамбля.

Программы, предлагавшиеся для прослушивания, были записаны в радиовещательной студии, причем число и расстановка микрофонов выбирались квалифицированным звукорежиссером применительно к характеру записываемой музыки и составу исполнителей. Отрывки звучаний, предназначавшиеся для исследования условий предпочтительности, были подготовлены звукорежиссером в двух вариантах — стерео- и монофоническом. Эти отрывки длительностью около 20 с представляли симфоническую и эстрадную музыку, а также хоровое пение. Прослушивание сравниваемых отрывков происходило в комнате площадью 26 м². Слушатели размещались на разных участках этой площади, различавшихся расстоянием от базы и положением относительно оси симметрии системы. Конечно, участки не закреплялись за слушателями, которым в различных сеансах приходилось слушать одни и те же программы на разных местах.

Высказывания слушателей о предпочтении того или другого из сравниваемых вариантов (стереофоническое звучание и монофонический вариант, воспроизводимый теми же двумя громкоговорителями) обрабатывались

раздельно для каждого участка площади. Предпочтительность стереофонии определялась относительным числом предпочтений стереоварианта (в процентах к общему числу показаний на том же участке). На рис. 37 изображены кривые равной предпочтительности (в процентах), построенные путем интерполирования распределения оценок предъявлявшихся отрывков; левая сторона плана комнаты относится к воспроизводящей системе с двумя агрегатами, разнесенными на 3 м, правая — к системе, совмещенной в общей консоли при $b = 1{,}2$ м.

Для сравнительной оценки систем предлагаются следующие критерии:

1. Зоной «полосного» стереоэффекта считается та часть площади, где предпочтительность не ниже 75%, если при этом удовлетворяется условие уверенного различения по меньшей мере трех направлений локализации источников (левый край, середина, правый край).

2. В зоне «частичного» стереоэффекта предпочтительность заключена в интервале от 60 до 75%, причем имеется возможность хотя бы неуверенной локализации.

3. На остальной части площади стереофонический эффект можно считать отсутствующим.

В табл. 2 представлены данные, характеризующие разнесенную систему при различной величине базы и систему, совмещенную в общей консоли.

Таблица 2

Тип воспроизводящей системы	База, м	S_1	S_2	S_3
Разнесенная	1,2	5	15	80
	1,8	10	25	65
	2,4	15	30	55
	3,0	30	27	43
	3,5	0	49	51
Совмещенная	1,2	0	11	89

Показателями являются относительные (в процентах от площади комнаты) размеры зон полного S_1 и частичного S_2 стереоэффекта, а также зоны отсутствия эффекта S_3.

Отметим некоторые выводы, сделанные авторами работы на основании накопленного материала.

Выяснилось, во-первых, что одиночный источник локализуется лучше, чем источник, звучащий в составе ансамбля; по-видимому, это объясняется маскировкой локализуемого источника звучанием всех остальных. Во-вторых, отмечается, что соответствие кажущегося взаиморасположения инструментов истинному не оказывает влияния на предпочтительность стереофонического воспроизведения оркестровой музыки, если звучащий ансамбль разделяется хотя бы на две друг друга не заглушающие части.

Лучшие места для слушания находятся на оси симметрии системы и удалены от громкоговорителей примерно на $0{,}7\,b$, т. е. на 2 м при оптимальной базе 3 м.

Отмечается, наконец, то обстоятельство, что зоны уверенной локализации источников не менее чем по трем направлениям хорошо совпадают с зонами высокой степени предпочтительности стереофонии ($\geqslant 75\%$); на этом основании делается вывод, что предпочтительность обусловлена

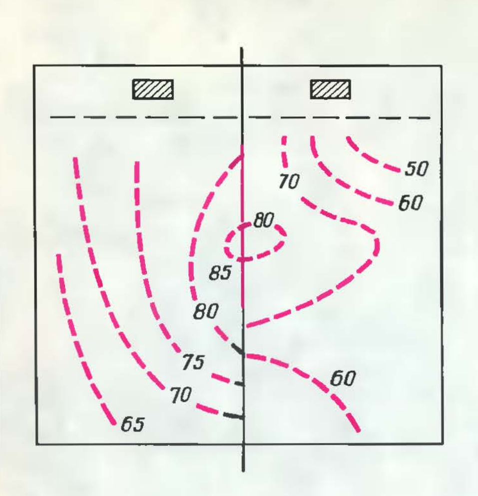


Рис. 37

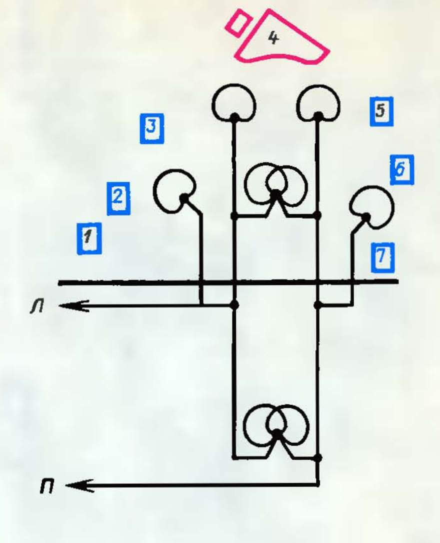


Рис. 38.

именно пространственной разделимостью деталей звуковой картины. Однако этот вывод не кажется достаточно обоснованным, поскольку пространственная структура звукового образа зависит от художественных приемов звукорежиссуры. В частности, исследование раздельной локализации источников было выполнено Г. С. Гензелем на примере двухканальной записи эстрадного оркестра при расстановке микрофонов, изображенной на рис. 38. Как расстановка микрофонов, так и распределение первичных сигналов по каналам ясно указывают на выбранный звукорежиссером план построения звуковой картины: к левой ее части отнесены тромбон *1*, кларнет *2* и труба *3*, к правой — банджо *5*, контрабас *6* и ударные инструменты *7*, середина же, несколько перекрывающая правую и левую части, отведена роялю *4*. Нетрудно видеть, что упомянутое условие локализационной «полноты» стереоэффекта будет при этом выполняться всюду, где неизоморфные сигналы *Л* и *П* имеют сравнимые уровни и не маскируют друг друга. Возможность выполнения этого условия за пределами зоны 75%-ной предпочтительности нельзя считать исключенной, равно как и возможность уверенного предпочтения стереофонии при ином звукорежиссерском решении. Действительно, многие звукорежиссеры считают, что при передаче симфонической музыки в отличие от эстрадной не следует подчеркивать различие направлений на отдельные инструментальные группы, так как при этом у слушателя возникает впечатление чрезмерной близости к оркестру; вместе с тем хорошо известно, что лучшие места в концертном зале находятся в достаточном удалении от эстрады, там, где диффузная звуковая энергия значительно преобладает над прямой, а возможность раздельной локализации инструментов практически отсутствует.

Как уже говорилось, несовпадение канальных сигналов по форме нужно считать необходимым условием правильного использования стереофонической техники, во всяком случае при передаче музыки. В работе [Л. 9] было предпринято исследование зависимости, статистически связываю-

щей различимость канальных сигналов стереофонической пары с различимостью двух вариантов ее воспроизведения — стерео- и монофонического.

Прослушивание подготовленного звукового материала происходило в зале с объемом 290 м^3 и средним временем реверберации 0,5 с. В головной части зала располагались двухполосные громкоговорители; источником сигналов служил стереомагнитофон. Частотная характеристика трактов воспроизведения, снятая по давлению в зоне слушательских мест, удовлетворяла нормативным требованиям в диапазоне 50—12 000 Гц. В зале была выделена зона наличия стереофонического эффекта, в пределах которой можно было разместить 9 слушателей (рис. 39). Чтобы исключить возможное влияние экранирования источников звука головами впереди сидящих слушателей, задние места были несколько приподняты над передними. В прослушиваниях приняли участие 51 эксперт.

Из двухканальных фонограмм, стереофонически записанных в Государственном доме радиовещания и звукозаписи в Москве, были выбраны 13 отрывков (главным образом симфонической музыки) с длительностью 6—10 с. Выбранные отрывки перечислены ниже с указанием произведений, из которых они были взяты.

1. Брамс. Венгерский танец № 1
2. Равель. Концерт для ф. п. с оркестром.
3. Штраус. Вальс «Весенние голоса» (отрывок 1).
4. Рахманинов. Мелодия (женск. голос).
5. Щедрин. Симфонические фанфары.
6. Штраус. Вальс «Весенние голоса» (отрывок 2).
7. Стравинский. Полька.
8. Уткин. «Размышление» (ансамбль скрипачей).
9. Бах. Французская увертюра (рояль).
10. Брамс. Венгерский танец № 16.
11. Портер. Увертюра к опере «Целуй меня, Кэт».
12. Прокофьев. Вальс.
13. Портер. Увертюра к опере «Целуй меня, Кэт».

Различимость сигналов, а также и способов их воспроизведения, устанавливалась и количественно оценивалась так, как это описано в § 2. В ходе испытаний экспертам дважды предлагалось прослушать серию из 13 отрывков. Если в одном из экспериментов варианты предъявлялись в последовательности ABA и правильным был ответ «X есть A», то в другом последовательность предъявлений имела вид ABB и правильным был ответ «X есть B» (конечно, порядок предъявлений не был известен слушателям). Общее число экспертопоказаний, накопленных для исследования каждой из различимостей, составило $2 \times 13 \times 51 = 1\,326$.

При изучении различимости сигналов стереофонической пары они поочередно предъявлялись на одном и том же уровне громкости, причем на световом табло зажигались соответствующие буквенные символы. Полная длительность сеанса прослушиваний не превышала 30 мин с тем, чтобы исключить влияние утомления слушателей на точность их показаний.

Сложнее оказалась задача сравнения моно- и стереофонического воспроизведения исследуемых звучаний. Первоначально предполагалось сопоставлять со стереофонической передачей звучание суммы канальных сигналов, монофонически воспроизводимой двумя параллельно включенными громкоговорителями. Выяснилось однако, что не все фонограммы удовлетворяют условию совместимости. Поэтому пришлось выбрать другое решение: в качестве моноварианта слушателям предъявлялось звучание одного из

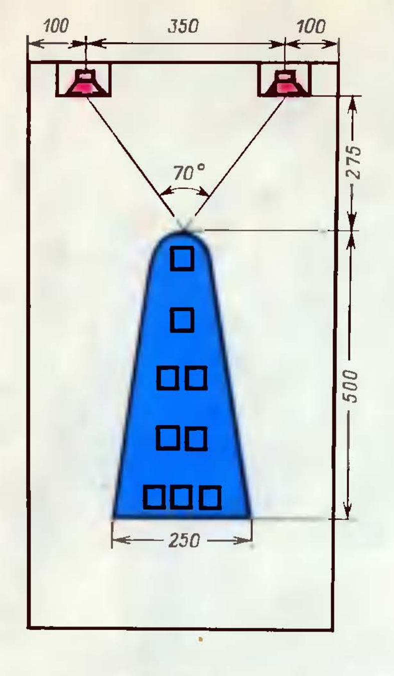


Рис. 39.

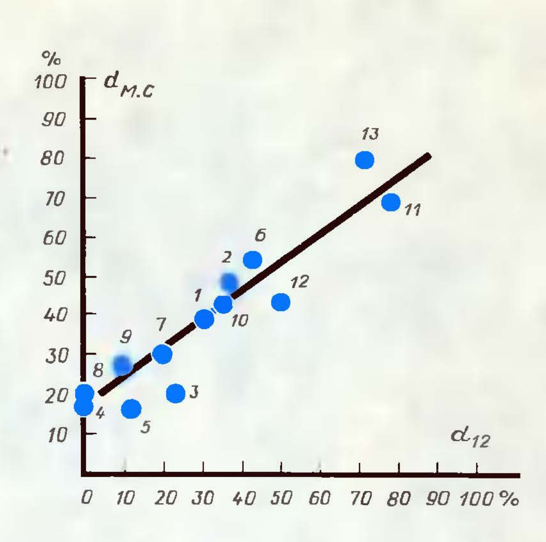


Рис. 40.

канальных сигналов, воспроизводимое, конечно, обоими громкоговорителями. При этом задача различения вариантов стала более легкой, зато она решалась в одних и тех же условиях для всех фонограмм.

На рис. 40 изображена диаграмма, характеризующая связь различимости $d_{м.с}$ стерео- и моноварианта воспроизведения с различимостью d_{12} сигналов соответствующей стереофонической пары. Показания, использованные для построения диаграммы, были даны наиболее квалифицированными экспертами. Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам приведенных на стр. 54 отрывков из фонограмм. Изображенная на диаграмме прямая регрессии $d_{м.с.}$ на d_{12} определяется уравнением $M\{d_{м.с.}\} = 18 + 0{,}73\, d_{12}$, а коэффициент корреляции получился равным 0,94.

Уравнение регрессии допускает простое толкование. Когда канальные сигналы изоморфны ($d_{12} = 0$), математическое ожидание $M\{d_{м.с.}\}$ различимости стерео- и моноварианта не должно обращаться в нуль, так как эти варианты могут различаться по признаку наличия и отсутствия локализационных эффектов. По мере возрастания различимости канальных сигналов стереофоническое звучание все заметнее отличается от монофонического благодаря прогрессирующей декорреляции сигналов, излучаемых громкоговорителями при воспроизведении стереопары.

Конечно, представленные здесь экспериментальные данные, убедительно подтверждая зависимость $d_{м.с.}$ от d_{12}, не позволяют сделать какие-либо выводы относительно мотивов предпочтения стереофонической передачи по сравнению с монофонической в тех случаях, когда такое предпочтение действительно имеет место. Можно однако утверждать, что понятие предпочтительности приобретает объективный смысл только в применении к вариантам, различие которых существенно превышает порог заметности.

Так как это превышение связано именно с различием формы канальных сигналов, то их различимость становится необходимым, хотя, конечно, недостаточным условием предпочтения, отдаваемого стереофонической передаче музыки.

11. СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ СИГНАЛОВ

Ссылаясь на классификацию звуковых систем (§ 5), напомним, что стереофония отличается от моно- и псевдостереофонии передачей двух (или большего числа) несовпадающих сигналов, воспроизводимых на выходной стороне пространственно разнесенными громкоговорителями. Складываясь во вторичном поле, эти сигналы, вообще говоря, интерферируют. Однако текущие (т. е. переменные во времени) интерференционные явления, сопровождающие сложение сигналов в воздухе, приводят при бинауральном восприятии к эффектам, значительно отличающимся от тех, которые наблюдались бы при сложении тех же сигналов в форме электрических колебаний, в частности, при их совместной подаче на один и тот же громкоговоритель.

Рассмотрим в качестве характерного примера сложение сигнала с его запаздывающим повторением. Сумма

$$F_\tau(t) = \varphi(t) + \varphi(t - \tau) \quad (21)$$

принадлежит семейству гомеоморфных сигналов, различающихся по параметру τ, начальное значение которого равно нулю. Как было сказано в § 2, различимость сигналов $F_0(t)$ и $F_\tau(t)$ можно оценить числом пороговых единиц, т. е. числом ступеней изменения задержки τ в последовательности дифференциальных порогов. Как показывает опыт, первый порог заметности наличия задержанного сигнала, добавленного до звуковоспроизведения, т. е. в электрическом канале, соответствует очень малым запаздываниям — от 0,06 (симфоническая музыка) до 0,2 мс (труба в сопровождении рояля). В интервале значений τ от 0 до 1 мс в отдельных случаях может уложиться до десятка пороговых единиц. Столь высокая степень заметности запаздывающего повторения связана с изменением спектра суммарного сигнала. Действительно, частотная характеристика операции сложения сигналов $\varphi(t)$ и $\varphi(t - \tau)$ имеет глубокий минимум на частоте $f_1 = 1/(2\tau)$, соответствующей сложению в противофазе. Так, например, $f_1 = 5$ кГц при $\tau = 0{,}1$ мс; введение такого временного сдвига приводит к достаточно заметному срезанию высоких частот в спектре сигнала F_τ.

Вместе с тем при суперпозиции сигналов в воздухе (т. е. при их воспроизведении двумя громкоговорителями по независимым каналам) первый порог заметности наблюдается при гораздо больших задержках — от 10 до 15 мс в случае речи и выше 20—30 мс для музыкальных звучаний. Еще более существенно то, что заметность добавления запаздывающего сигнала определяется теперь совершенно иным признаком, чем при обычном сложении: звучание сигнала F_τ кажется более реверберирующим по сравнению с F_0.

Нужно также отметить часто встречающийся случай, когда несколько групп инструментов оркестра, значительно различающихся по тембру (например, струнные и деревянные духовые инструменты), исполняют одинаковые партии. Даже и при использовании нескольких микрофонов, закрепленных за этими группами, сложение сигналов в процессе микширования неизбежно приводит к более или менее регулярным интерференционным эф-

фектам. В результате вместо нескольких несовпадающих тембров слушатель воспринимает некое суммарное звучание, исключающее возможность разделить и правильно отнести по принадлежности спектральные характеристики различных одновременно звучащих инструментов; звучание каждого из них кажется искаженным. Стереофоническая же передача, организованная квалифицированным звукорежиссером, обеспечивает разделимость соответствующих сигналов путем надлежащего их разнесения по каналам.

Некоторые особенности слухового восприятия стереофонически складывающихся сигналов выясняются на сравнительно простом примере двухканальной системы; для дальнейшего упрощения будем пренебрегать не только дифракцией звука вокруг головы, но и влиянием отражений во вторичном поле. Эти выводы легко обобщаются на более сложные случаи.

Пусть громкоговорители двухканальной системы излучают сигналы $f(t)$ и $\varphi(t)$; через $F_1(t)$ и $F_2(r)$ обозначим сигналы, принимаемые при этом правым и левым ухом слушателя. С учетом оговоренных упрощений запишем эти сигналы в виде

$$\left.\begin{aligned} F_1(t) &= f(t) + \varphi(t-\theta_1); \\ F_2(t) &= f(t-\tau) + \varphi(t-\tau-\theta_2), \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

где τ — разность времен прихода сигнала f к правому и к левому уху; θ_1 и θ_2 — временные сдвиги между сигналами f и φ соответственно для правого и для левого уха.

Сравнивая (21) и (22), видим, что в отличие от F_τ суммы F_1 и F_2 представляют результаты сложения двух различных сигналов в общем случае с разными временными сдвигами в каждой паре (θ_1 и θ_2). Возникающие при сложении интерференционные эффекты теперь уже не являются однозначно детерминированными, как в случае суммы F_τ; помимо того текущие эффекты, обнаруживающиеся в сигналах F_1 и F_2, взаимно независимы и не синхронны.

Важное значение имеет то обстоятельство, что различие сигналов f и φ не остается без влияния на статистическую связь между сигналами F_1 и F_2. Нужно заметить, что несовпадение принимаемых ушами сигналов не только по уровню и времени, но и по форме, обусловливает бинауральный эффект в более или менее общем смысле этого слова, о чем подробнее будет сказано далее. Взаимная корреляция сигналов F_1 и F_2 не может не учитываться при исследовании стереофонического эффекта независимо от того, идет ли речь о локализации кажущихся источников или об имитации звуковой обстановки.

Функция текущей взаимной корреляции сигналов F_1 и F_2, характеризующая степень их статистической связи, имеет вид (см. § 1):

$$r(t) = \frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-(t-x)/T} F_1(x)F_2(x)\,dx, \tag{23}$$

где T — постоянная времени весовой функции, экспоненциально убывающей в сторону прошлых значений сигналов (здесь x имеет также смысл времени). Подставляя (22) в (23), замечаем, что в любой момент времени взаимная корреляция выражается суммой четырех слагаемых:

$$r(t) = r_{ff}(\tau) + r_{\varphi\varphi}(\tau + \theta_2 - \theta_1) + r_{f\varphi}(\tau - \theta_1) + r_{f\varphi}(\tau + \theta_2). \tag{24}$$

Каждый из членов суммы представляет переменную во времени связь двух сигналов со сдвигом, указанных в скобках. Первые два члена опре-

деляют автокорреляцию канальных сигналов; два последних члена характеризуют текущую связь двух разных сигналов f и φ, тем более слабую, чем значительнее различие форм этих сигналов. Очевидно, что при заданном размещении громкоговорителей относительно слушателя связь сигналов F_1 и F_2 будет наиболее тесной при совпадении функций f и φ, когда все четыре члена в (24) представляют автокорреляцию одного и того же сигнала, достаточно сильную при малых величинах временного сдвига, не превышающих 0,1 мс.

Отсюда следует, что отсутствие изоморфизма канальных сигналов влечет за собой декорреляцию звучаний, принимаемых ушами слушателя во вторичном поле. Очевидно также, что увеличение числа каналов может только ослабить взаимную корреляцию сигналов F_1 и F_2. Наличие отражений, накладывающихся на сигналы F_1 и F_2 с различными временными структурами, приводит к дальнейшей их декорреляции.

Наконец, нужно отметить еще немаловажную роль пространственного размещения громкоговорителей. При сближении громкоговорителей ($b \to 0$) излучаемые ими сигналы, приходя к слушателю по одному и тому же направлению, в наибольшей степени маскируют друг друга; поэтому расширение базы до известного предела усиливает стереофонический эффект, связанный с различием канальных сигналов. Конечно, чрезмерно большое удаление громкоговорителей друг от друга приводит к разрыву звуковой картины и, следовательно, к снижению эстетической оценки звучания. В табл. 2 уже были приведены экспериментальные данные Г. С. Гензеля, хотя и полученные для частного случая, но иллюстрирующие характер зависимости размеров зоны стереоэффекта от базы громкоговорителей.

12. ЭСТЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТЕРЕОФОНИИ

Определение стереофонии как электроакустической передачи сложного сигнала с сохранением информации о размещении его источников представляется слишком узким и оставляет в стороне вопрос об эстетической ценности стереофонического звучания.

Необходимо прежде всего отметить тот факт, что преимущества стереофонии обнаруживаются особенно отчетливо при воспроизведении полифонической музыки — симфонической и эстрадной. Именно в этом случае моно- и стереофоническое звучание уверенно различаются по качеству, причем предпочтительность стереофонии далеко не всегда связывается с раздельной локализацией инструментов и их групп. Гораздо чаще отмечается так называемый эффект присутствия — ощущение акустической обстановки концертного зала, куда переносит слушателя стереофонически воспроизводимая музыка, записанная квалифицированным звукорежиссером.

При стереофонической передаче музыки, исполняемой оркестром или ансамблями, неизменно отмечается то качество воспроизводимого звучания, которое принято называть прозрачностью: слушатели оказываются в состоянии очень отчетливо выделить из общей звуковой массы партию того или иного инструмента и даже отличить друг от друга одинаковые партии, исполняемые разными инструментами. На первый взгляд может показаться, что прозрачность звучания связана с раздельной локализацией источников и не должна рассматриваться как независимая составляющая стереофонического эффекта. Конечно, раздельная локализация источников влечет за собой и разделимость соответствующих сигналов; однако обратное заключение — от разделимости к локализации — было бы неправомер-

ным. Действительно, в условиях непосредственного восприятия разделимость сигналов определяется в общем случае совершенно иными факторами, которые могут быть до известной степени имитированы при электроакустической передаче.

Изложенные в этой главе экспериментальные результаты и выводы из наблюдений побуждают считать, что предпочтительность стереофонической передачи музыки обусловлена не только и не столько раздельной локализацией источников сложного сигнала, сколько имитацией каких-то других свойств бинаурального слуха, обнаруживающихся не столь просто и непосредственно, как определение направления прихода звука. Этот последний эффект наблюдается наиболее отчетливо в условиях неограниченного пространства, когда за прямым звуком не следуют запаздывающие отражения, приходящие по самым различным направлениям. При слушании музыки в концертном зале на таком расстоянии от эстрады, при котором многократно отраженная звуковая энергия значительно преобладает над прямой, пространственный аспект бинаурально ощущаемого звукового образа имеет иное, более сложное содержание.

Слушая симфоническую музыку на лучших местах концертного зала, т. е. в достаточном удалении от оркестра, локализуем звуковой образ как целое в направлении эстрады; пространственными параметрами образа являются его угловая ширина и, может быть, еще пеленг на центр. Временна́я структура ранних отражений определяет слуховое впечатление большего или меньшего объема зала, что также может быть отнесено к пространственной характеристике воспринимаемого звучания. Наряду с этим звуковой образ воспринимается как сложное развертывающееся во времени многообразие, упорядоченное в том смысле, что оно допускает однозначное расчленение на более простые составляющие, соответствующие партиям отдельных групп инструментов. Пользуясь термином, заимствованным из теории связи, можно сказать, что эстетическое восприятие музыки должно включать в себя разделение сигналов по форме и притом такое, которое позволяет уверенно отличить от их разделения по пеленгу, осуществимого из первых рядов или с пульта дирижера; конечно, разделимость сигналов по пеленгу и по форме отнюдь не равноценны эстетически.

Форма звукового сигнала есть совокупность всех тех его признаков, благодаря которым слушатель предугадывает — иногда правильно, иногда с ошибкой — неизвестный ему последующий ход сигнальной функции, сохраняя в кратковременной памяти ранее принятые элементы сообщения. Именно возможность гипотетической экстраполяции «прошлого» в «будущее» отличает сигнал, несущий эстетическую информацию, от бесформенного широкополосного шума. Желая выделить из сложной звуковой ткани партию того или иного инструмента, вслушиваемся в звучание музыки с целью подметить те его элементы, которые связываются в непрерывно экстраполируемые последовательности. Многообразие сложного сигнала в музыкальном восприятии упорядочено вовсе не в его пространственном аспекте, но в силу того, что сигналы, из которых оно органически складывается, допускают разделение по форме.

В качестве наглядной иллюстрации можно привести следующее сравнение: несколько различных штриховых рисунков могут быть либо размещены один рядом с другим, либо же наложены друг на друга. В первом случае они разделены в пространстве, во втором — разделимость становится возможной благодаря различию форм. Термин «форма» имеет здесь все тот же смысл: следуя взглядом за линией какого-нибудь одного из совмещенных рисунков, тем увереннее выбираем на каждом пересечении путь дальней-

шего следования, чем более отчетливо чувствуем форму, т. е. связь ранее пройденного пути с ближайшим его продолжением.

При непосредственном слушании музыки в концертном зале бинауральный слух облегчает разделение одновременно звучащих сигналов, обостряя восприятие их форм и, следовательно, усиливая различие разделяемых форм. Дело в том, что в более или менее диффузном поле сигналы, принимаемые левым и правым ухом, не тождественны: несмотря на высокую степень сходства этих сигналов, их осцилограммы не совпадают после приведения к общим началу и масштабу. Как об этом уже говорилось, несовпадение связано с незначительными различиями временно́й структуры отражений в двух близких, но все же пространственно разделенных точках поля. Одновременное наличие двух друг друга дополняющих сообщений об одном и том же звуковом событии приводит к обогащению принимаемой информации; отсюда и обостренное чувство формы сигнала, бинаурально воспринимаемого в диффузном поле концертного зала.

Возможности, открываемые стереофонической техникой для преодоления той эстетической неполноценности монофонического звучания, которую уже нельзя приписать несовершенству аппаратуры, в очень значительной степени связаны с имитацией специфики бинаурального восприятия звука в закрытых помещениях. Несовпадение форм принимаемых ушами сигналов, определяющее эту специфику, может быть с успехом имитировано благодаря различию сигналов, передаваемых по каналам стереофонической системы (см. § 1).

Подводя некоторые итоги, можно взамен той точки зрения на стереофонию, которая была сформулирована в самом начале этой главы, выдвинуть другую, более содержательную и лучше раскрывающую эстетический аспект стереофонического звучания музыки.

Стереофония объективно отличается от монофонической передачи воспроизведением двух (или большего числа) неизоморфных и некогерентных сигналов, несущих взаимно дополнительные информации; текущие интерференционные эффекты, сопутствующие сложению таких сигналов, не изменяют тембра звучаний; при бинауральном их восприятии в умеренно реверберирующем помещении сохраняется уверенная разделимость различных составляющих передаваемой информации. Декорреляция сигналов, принимаемых ушами слушателя, придает звучанию объемность, имитирующую акустическую атмосферу большого зала.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕРЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

13. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Итак, не раз отмечалось, что в подавляющем большинстве случаев звуковые системы используются в современной технической практике не для того, чтобы создать на выходной стороне сквозного тракта такое звуковое поле, которое возможно меньше отличалось бы от первичного поля на входной стороне. Существуют однако задачи, для решения которых необходимо именно электроакустическое копирование звукового поля (или некоторой его области) и притом настолько точное, чтобы различие между вторичным и первичным полем оставалось незаметным на слух. В частности, такие задачи стали с недавнего времени ставиться в архитектурной акусти-

ке в связи с проблемой субъективной оценки слышимости в закрытых помещениях, в особенности в концертных залах, к которых предъявляются наиболее строгие требования.

В качестве критериев акустического качества залов общественного назначения выбираются те или иные физические величины, доступные для измерения и расчета — время реверберации, соотношение диффузной и прямой энергии, запаздывание ранних отражений и т. п. Ближайшей задачей становится затем определение области оптимальных значений выбранных критериев; конечно, это может быть сделано только на основе более или менее надежных слуховых оценок. Так, например, рекомендации относительно оптимума реверберации опираются на опыт эксплуатации залов и театров с хорошей акустической репутацией. Не следует, впрочем, забывать о том, что репутации концертных залов складываются не без влияния целого ряда побочных факторов таких, как архитектурное решение интерьера, выбор программ и исполнителей, традиции, мода и т. д. Поэтому оптимальные значения времени реверберации, рекомендуемые в различных справочниках и монографиях, варьируют в довольно широких пределах. Основываясь на акустической репутации, не всегда можно сравнивать залы по условиям слышимости: еще труднее связать время реверберации зала с его отнесением к тому или иному классу качества.

Одним из условий объективной значимости слуховых оценок акустического качества зала в зависимости от тех или иных физических факторов является возможность многократно предъявлять достаточно большому числу экспертов звучание одно и того же музыкального произведения в различных архитектурно-акустических условиях (в частности, в различных зонах мест) или звучание разных произведений в одних и техже условиях. При этом сравниваемые варианты должны предъявляться с минимальным интервалом (несколько секунд) с учетом кратковременности слуховой памяти. Совершенно очевидно, что организация такой экспертизы в натурных условиях может считаться невыполнимой. Естественно, возникает мысль об использовании многоканальных звуковых систем, с помощью которых можно было бы оперативно переносить экспертов из одной архитектурно-акустической обстановки в другую с сохранением всей (или хотя бы важнейшей) пространственной информации, доступной при непосредственном восприятии.

ДИОТИЧЕСКОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ОБСТАНОВКИ

На первый взгляд кажется, что простейшее и притом безупречное решение задачи может дать диотическая передача (см. § 7). Однако, как об этом уже было сказано, решение оказывается далеко не столь простым, главным образом из-за локализации звукового образа внутри головы; при этом уже не приходится говорить об адекватном воспроизведении акустической обстановки первичного поля.

Работы, проводившиеся в течение нескольких последних лет в Институте технической акустики в Западном Берлине, привели все же к успешному использованию диотической передачи как способа предъявления экспертам различных архитектурно-акустических обстановок с целью их сравнения и эстетической оценки. Р. Кюрер, Г. Пленге и Г. Вилькенс считают, что неудача всех предшествующих попыток объясняется лишь несовершенством моделирования человеческой головы и неправильно выбранными условиями слушания сигналов, воспроизводимых наушными телефонами. В работе [Л. 35] описан макет, имитирующий не только форму го-

ловы и ушных раковин, но и кожный покров, волосы и плечи; при изготовлении макета и его аппаратурном оснащении были приняты меры к имитации свойств слухового прохода и к правильному подбору замыкающего акустического сопротивления, которым в натуре является сопротивление барабанной перепонки с лежащими за ней слуховыми косточками. Воспроизведение звука осуществлялось электродинамическими телефонами с очень ровной частотной характеристикой (отклонения от среднего не превышали $\pm 2{,}5$ дБ во всем диапазоне слышимых частот). Телефоны фиксировались на небольшом расстоянии от ушей с тем, чтобы слуховой провод не был замкнут и чтобы слушатель не ощущал давления на ушную раковину.

С целью проверки точности диотической передачи в концертном зале новой Берлинской филармонии было размещено шесть макетов (в точках $E_1, \ldots, E_6$, рис. 41), с помощью которых делались одновременные записи различных музыкальных произведений, исполняемых симфоническим оркестром полного состава. При воспроизведении экспертам поочередно предъявлялись два варианта звучания, различающиеся местом записи, эксперты должны были ответить на вопрос о тождественности или нетождественности предъявленных вариантов. Результаты испытаний приведены в табл. 3, где цифры на пересечении строк и столбцов дают процентное число правильных ответов при сравнении вариантов соответствующей пары. Диагональ таблицы представляет результат сравнения совпадающих звучаний (конечно, экспертам ничего не сообщалось о том, какие пары предъявляются в каждом отдельном испытании).

Как видно из таблицы, различие условий слышимости в разных точках зала лежит при диотической передаче значительно выше порога заметности. Нужно однако сказать, что уверенная заметность этого различия является хотя и необходимым, но еще недостаточным условием значимости субъективных оценок качества в условиях электроакустического копирования первичного поля.

Диотическая передача время от времени используется для слуховой оценки качества проектируемых, но еще не построенных залов путем экспертного прослушивания музыки, стереофонически записанной в уменьшенной трехмерной модели зала [Л. 16]. Фонограммы, записанные в условиях минимальной реверберации, воспроизводятся в модели при повышенной скорости, т. е. с транспонированием спектра соответственно масштабу моделирования. Транспонированное звучание в той или иной точке модели записывается на двух дорожках; для приема звука служит уменьшенный макет головы с двумя миниатюрными микрофонами. Сделанная запись

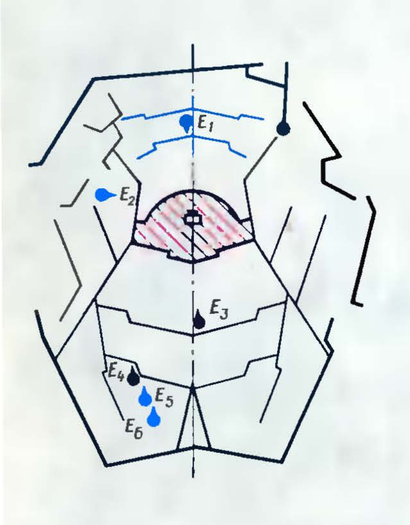


Рис. 41.

Таблица 3

	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
E_2	95	93	85		
E_3		83	83		
E_4			88	93	83
E_5				88	86
E_6					93

прослушивается экспертами через наушные телефоны одновременно с обратным транспонированием, т. е. при соответственно уменьшенной скорости фонограммы. Инициатор этого метода Ф. Шпандек [Л. 46], оценивая возможности обеспечения акустического подобия оригинала и модели, а также создания электроакустической аппаратуры для излучения, записи и бинаурального приема транспонированных сигналов, приходит к выводу, что основные задачи объемного моделирования уже можно считать успешно решенными. Приведем однако высказывание Л. Кремера — одного из наиболее авторитетных специалистов в области архитектурной акустики:

«Я придерживаюсь того мнения, что требуемое совпадение по форме и по звукопоглощению во всей области звуковых частот, которого удалось добиться Шпандеку и его сотрудникам, является идеалом архитектурно-акустического моделирования, но оно лишь редко может быть достигнуто на практике. Расходы на материалы и на изготовление такой модели, а также на ее детальное исследование, значительно превышают гонорар консультанта-акустика. Помимо этого для построения модели нужна информация, настолько обширная, что моделирование нельзя начать заблаговременно. А спустя три месяца, когда исследование будет закончено, сколько-нибудь существенные изменения проекта оказываются уже невозможными [Л. 24]».

ДИОТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА БЕЗ ТЕЛЕФОНОВ

Известный интерес представляет возможность диотической передачи с воспроизведением звука громкоговорителями, а не через телефоны. Для этого необходима эффективная компенсация двух обходных сигналов, один из которых принимается левым ухом от правого громкоговорителя, другой — правым ухом от левого громкоговорителя. Это может быть осуществлено с помощью компенсирующих противофазных сигналов, подаваемых на соответствующие громкоговорители. Экспериментальная система бестелефонной диотической передачи была осуществлена и описана П. Дамаске и В. Меллертом [Л. 25]; система получила сокращенное наименование TRADIS[1].

В этой системе сигналы, подводимые при воспроизведении к громкоговорителям, приготовляются из первичных сигналов, принятых микрофонами макета головы, путем специальных перезаписей, выполняемых в заглушенной камере. При перезаписи в камере устанавливают макет головы (заменяющий здесь слушателя) и два громкоговорителя, расположеные под теми же углами ($\pm 35^\circ$) и на том же расстоянии (2,6 м), как и в процессе последующего воспроизведения. Все записи совмещают на одном и том же носителе с тем, чтобы соответствующие сигналы были синхронизированы. Для записи и перезаписи был использован 7-дорожечный магнитофон с частотной модуляцией (AMPEX FR1 300), обеспечивающий практическое отсутствие частотных и фазовых искажений при многократной перезаписи.

В последующих формулах, описывающих преобразование первичных сигналов $f_R(t)$ и $f_L(t)$, принятых правым и левым ухом макета головы, введены следующие обозначения:

r, l — импульсные переходные функции соответственно правого и левого громкоговорителя;

---

[1] The Reproduction of All Directional Information by Stereophony.

ρ_R, ρ_L — импульсные переходные функции правого уха макета головы при приходе сигнала соответственно от правого и от левого громкоговорителей;

λ_L, λ_R — импульсные переходные функции левого уха при приходе сигнала соответственно от левого и от правого громкоговорителей;

T — время распространения сигнала от громкоговорителя до ближайшего к нему уха;

$T + \tau$ — время распространения обходного сигнала.

Далее, небесполезно напомнить о форме математического преобразования, определяющего выходной сигнал линейной системы при заданном входном. Произвольный сигнал $x(t)$ на входной стороне системы передачи можно приближенно представить в виде тесной последовательности очень коротких импульсов, высоты которых определяются значениями функции $x(t)$ в соответствующие моменты времени. Пусть $h(t)$ есть импульсная переходная функция системы, т. е. ее реакция на единичный импульс: реакцию $y(t)$ линейной системы на произвольное внешнее воздействие можно найти путем сложения ее реакций на каждый из импульсов последовательности, представляющей входной сигнал $x(t)$. После перехода к пределу операция такого сложения приводится к интегральному преобразованию

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} h(t-\theta)x(\theta)d\theta,$$

которое принято называть сверткой функций $h(t)$ и $x(t)$. В дальнейшем операция свертки будет обозначаться символом $*$.

[Заметим, что формулы (2) и (3), с которыми встречались в гл. 1, являются частными случаями свертки с импульсной переходной функцией (1) интегрирующей RC-цепочки].

Возвращаясь теперь к преобразованиям сигналов в системе TRADIS, начнем с правого первичного сигнала $f_R(t)$, записанного на 1-й дорожке магнитной ленты.

Первая перезапись: сигнал $f_R(t)$ воспроизводится левым громкоговорителем (правый выключен) и со сдвигом на время T принимается левым ухом, причем на 4-ю дорожку записывается сигнал

$$l*\lambda_L*f_R(t-T). \tag{25}$$

Вторая перезапись: сигнал $f_R(t)$ вопроизводится в противофазе правым громкоговорителем (левый выключен) и со сдвигом $T + \tau$ принимается левым ухом; при этом на 6-ю дорожку записывается сигнал

$$-r*\lambda_R*f_R(t-T-\tau). \tag{26}$$

Конечно, перед второй перезаписью лента перематывается на начало с тем, чтобы записи сигналов (25) и (26) были синхронизированы.

При воспроизведении работают оба громкоговорителя; на правый подается сигнал (25), на левый — сигнал (26). При этом правое ухо принимает сигналы

$$l*\lambda_L*r*\rho_R*f_R(t-T-T) \tag{27}$$

от правого громкоговорителя и

$$-r*\lambda_R*l*\rho_L*f_R(t-T-\tau-T-\tau) \tag{28}$$

от левого. Левое ухо принимает сигналы

$$l*\lambda_L*r*\lambda_R*f_R(t-T-T-\tau) \tag{29}$$

от правого громкоговорителя и

$$-r*\lambda_R*l*\lambda_L*f_R(t-T-\tau-T) \tag{30}$$

от левого. Как нетрудно видеть, сигналы (29) и (30) совпадают по форме, но складываются в противофазе; они взаимно уничтожаются, так что правый первичный сигнал f_R не воспринимается левым ухом. Далее, сравнивая сигналы (27) и (28), убеждаемся в том, что вследствие двукратного экранирования головой (свертки λ_R и ρ_L) сигналы (28) значительно слабее; правое ухо практически принимает только сигнал (27), соответствующий первичному правому.

Аналогичным порядком выполняется преобразование левого первичного сигнала $f_L(t)$, записанного на 2-й дорожке. При первой перезаписи через правый громкоговоритель и правое ухо макета на 3-ю дорожку записывается сигнал

$$r*\rho_R*f_L(t-T). \tag{31}$$

После перемотки и второй перезаписи через левый громкоговоритель (в противофазе) и правое ухо макета на 5-й дорожке получается запись сигнала

$$-l*\rho_L*f_L(t-T-\tau). \tag{32}$$

В процессе воспроизведения на левый громкоговоритель подается сигнал (31), а на правый — сигнал (32). При этом левое ухо принимает сигналы

$$r*\rho_R*l*\lambda_L*f_L(t-T-T) \tag{33}$$

от левого громкоговорителя и

$$-l*\rho_L*r*\lambda_R*f_L(t-T-\tau-T-\tau) \tag{34}$$

от правого. Правое ухо принимает сигналы

$$r*\rho_R*l*\rho_R*f_L(t-T-T-\tau) \tag{35}$$

от левого громкоговорителя и

$$-l*\rho_L*r*\rho_R*f(t-T-\tau-T) \tag{36}$$

от правого. Сигналы (35) и (36) взаимно уничтожаются, так что правое ухо не получает информации, несомой левым первичным сигналом f_L. Из двух сигналов, принимаемых левым ухом, сигнал (34) значительно слабее; левое ухо принимает лишь сигнал (33), представляющий первичный левый.

Описанное преобразование сигналов при воспроизведении сделано в предположении, что реальный слушатель замещен макетом головы. Но если этот макет достаточно точно отображает натуру, то слушатель, занимая такое же положение относительно громкоговорителей, будет принимать сигналы, практически не отличающиеся от (27) и (33). Это предположение подтверждается результатами экспериментального исследования системы, в ходе которого слушателю предлагалось определить направление прихода испытательного сигнала (речь или широкополосный шум) в пределах всего верхнего полупространства. Сопоставление слухового пеленга при воспроизведении по системе TRADIS с фактическим направлением прихода первичного сигнала к макету головы показало хорошую точность слуховых оценок. На рис. 42 представлены усредненные (по оценкам 20 экспертов) результаты пеленгации кажущегося источника речевого сигнала в горизонтальной плоскости. Радиусы закрашенных кружков пропорциональны от-

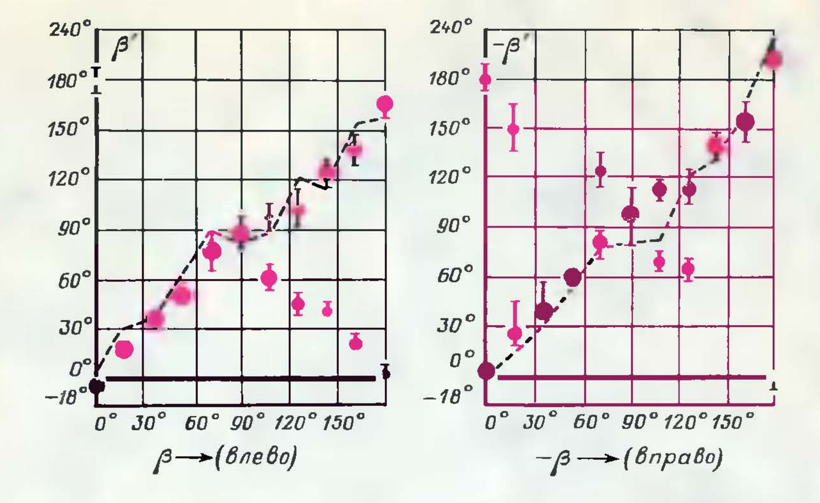


Рис. 42.

носительному числу соответствующих индикаций; ошибочные локализации зеркальных отражений источника относительно плоскости симметрии системы показаны отдельно. Пунктирная линия изображает результаты, полученные при диотической передаче с телефонами; сравнение позволяет считать, что по точности локализации система TRADIS по меньшей мере равноценна.

Небезынтересно отметить, что запись, сделанная в помещении с умеренной реверберацией (0,8 с), обеспечивает достаточно высокую точность локализации, как это видно из диаграммы рис. 43, построенной аналогично рис. 42; в опыте был использован шумовой сигнал, прослушиваемый в заглушенной камере. Был исследован и обратный случай: запись, сделанная в заглушенном помещении, прослушивалась в помещении с временем реверберации около 3 с. Предварительные опыты показали, что и в этом случае возможна качественно правильная локализация источника. Дамаске и Меллерт считают также, что система TRADIS правдоподобно передает впечатления, связанные с удалением источника и степенью гулкости первичного помещения.

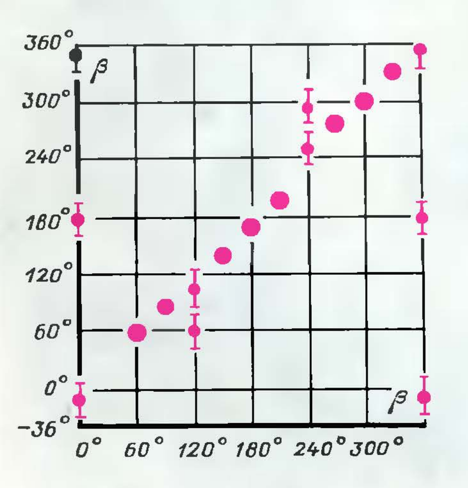


Рис. 43.

В позднее опубликованной работе тех же авторов [Л. 26] была показана возможность обойтись без искусственной головы и без камеры при перезаписях, необходимых для приготовления компенсирующих сигналов. Импульсную переходную функцию уха с учетом влияния дифракции звука вокруг головы удалось удовлетворительно аппроксимировать переходной характеристикой электрического *RC*-фильтра; необходимое запаздывание сигнала обеспечивалось линией задержки.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

До сих пор здесь говорилось о технических возможностях переноса слушателя в акустическую обстановку первичного поля, об электроакустическом копировании не столько самого поля, сколько создаваемого им бинаурального слухового ощущения. Задача более общего характера — именно восстановление некоторой более или менее протяженной области первичного поля — также допускает решение с той или иной степенью точности. Из такого понимания задачи исходил почти сорок лет тому назад Г. Флетчер, один из инициаторов хорошо известного опыта трехканальной передачи симфонического концерта из зала музыкальной Академии в Филадельфии в Зал Конституции в Вашингтоне. Идеальная звуковая система представлялась Флетчеру в виде большого числа независимых каналов, связывающих точечные микрофоны, равномерно распределенные на звукопрозрачном занавесе в первичном поле, с точечными излучателями, соответственно размещенными на выходной стороне. При неограниченном возрастании числа каналов вторичное поле излучателей будет все точнее воспроизводить первичное в той его области, где находятся слушатели, т. е. перед занавесом. Практически очень хороший результат получается уже при трех каналах.

Нет надобности говорить здесь об аппаратуре трехканальной системы, разработанной Флетчером и его сотрудниками. Заметим, однако, что, каково бы ни было число каналов, источники, расположенные в первичном поле перед «микрофонным занавесом», при воспроизведении будут локализованы слушателями в каких-то точках плоскости, содержащей идеальные громкоговорители; в частности, это относится к тем мнимым источникам, совокупность которых создает диффузную часть первичного поля. Поэтому при воспроизведении музыки слушатели теряют возможность разделять прямую и диффузную составляющие оригинального звучания, локализуемые в пределах одного и того же телесного угла. С этим связано очень существенное отличие вторичного поля от первичного, в котором один из компонентов (прямой звук) так или иначе локализован, тогда как второй (диффузный звук) вообще нелокализуем.

Многоканальная система, свободная от этого недостатка, описана М. Камрасом [Л. 23]. В идеальном теоретическом случае число каналов и здесь бесконечно, однако микрофоны предполагаются распределенными не в плоскости, отделяющей исполнителей от публики, а на замкнутой поверхности, ограничивающей некоторую область первичного поля, не содержащую источников. При этом акустические оси микрофонов направлены вовне. Выделим теперь такую же область в пространстве вторичного поля и разместим на ее границе громкоговорители, связанные отдельными каналами с соответственно размещенными микрофонами; акустические оси громкоговорителей направим внутрь. Если пренебречь отражениями во вторичном пространстве, то можно считать, что при достаточно большом числе каналов звуковые поля в двух выделенных областях будут неразличимы при слуховом сравнении.

Экспериментальная установка Камраса была 12-канальной. С учетом того, что способность локализовать источник звука проявляется лучше всего при пеленгации в горизонтальной плоскости и что прямой звук приходит в большинстве случаев спереди, большая часть микрофонов была размещена именно в этой плоскости, причем 7 микрофонов из 12 находились на передней границе выделяемого объема. На каждой из боковых поверхностей и на верхней границе имелось по одному микрофону; два ми-

крофона были поставлены сзади. Громкоговорители во вторичном пространстве размещались соответственно расстановке микрофонов; воссоздаваемую область поля можно было считать параллелепипедом с размерами $3\times3\times2,4$ м.

Сравнивая непосредственное восприятия с электроакустической копией, слушатели отмечали, как наиболее существенное, различие в степени гулкости: электроакустически воспроизводимое звучание казалось более реверберирующим. Интересно, что такой же эффект обнаруживается и при диотической передаче. Специально поставленный эксперимент показал, что при сравнении звучаний, воспринимаемых через наушные телефоны и по 12-канальной системе, слушатели не замечали разницы, снимая и вновь надевая оголовье в то время, когда одновременно работали обе системы.

Нельзя не заметить, что широко рекламируемая в последнее время квадрафония (см. § 6) представляет собой не что иное, как упрощенный вариант (4 канала вместо 12) системы, описанной Камрасом.

14. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Важнейшая и наиболее содержательная информация, которой в настоящее время располагаем относительно роли различных архитектурно-акустических факторов, абсолютных и дифференциальных порогов их восприятия, их влияния на оценку акустики зала в зависимости от свойств натуральных звучаний и т. п., получена не путем пассивного отображения звуковых полей, но активными методами синтеза разнообразных акустических обстановок. Такой синтез, открывающий широкие возможности раздельного или совместного изменения исследуемых факторов и допускающий быструю смену поочередно предъявляемых ситуаций, осуществляется посредством многоканальных звуковых систем с большим число громкоговорителей, размещаемых в заглушенной камере достаточно большого объема. Системы электроакустического моделирования такого типа имеются сейчас в ряде стран. Как на наиболее интересные примеры, можно указать на системы, осуществленные и широко используемые в Институте технической акустики в Дрездене и в 3-м Физическом институте Университета в Гёттингене. Представляется целесообразным совместить краткое описание этих систем с изложением некоторых интересных результатов, полученных на электроакустической модели, поскольку они имеют прямое отношение к задачам конструирования звуковых полей в системах со свободным доступом.

В заглушенной камере Гёттингенского университета для создания желаемой акустической обстановки предусмотрено 80 громкоговорителей, из которых 65 подвешены с таким расчетом, чтобы их диафрагмы располагались на поверхности полусферы радиусом 2,6 м. В ее центре находится место слушателя, на которое направлены оси громкоговорителей; их ортогональная проекция на горизонтальную плоскость изображена на рис. 44. Так как число оконченных усилителей составляет 80, то имеется возможность добавить еще 15 громкоговорителей, расставляемых на ходовой сетке камеры.

Для имитации дискретных отражений служат четыре магнитофона и линия задержки, позволяющая вводить очень малые сдвиги сигналов во времени. Устройство дает возможность получить до 17 дискретных отражений с запаздываниями от 0 до 0,5 с. Для создания сигналов искусственной

реверберации применяются листовой ревербератор и небольшая (92 м³) реверберационная камера.

Моделируемая акустическая обстановка, определяемая уровнями и запаздываниями дискретных отражений, их распределением по направлению прихода к слушателю, скорость убывания уровня реверберирующего звука и т. п., осуществляется путем соответствующей коммутации источников и потребителей сигналов. Для этого предусмотрен матричный коммутатор, в котором вертикальные шины (столбцы) связаны с источниками сигналов, а горизонтальные (строки) — с оконечными усилителями. Некоторое дополнительное число строк и столбцов соответствует входам и выходам дистанционно управляемых магазинов затуханий. Система коммутации дает также возможность быстрого перехода от одной заранее выбранной обстановки к другой; такой переход можно осуществлять и с места слушателя.

Нужно отметить, что вся эта система была разработана с учетом результатов исследований, проводившихся в течение нескольких лет с целью определения необходимой точности моделирования. Очевидно, нет надобности усложнять систему настолько, чтобы в ассортименте реализуемых обстановок оказались неразличимые при слуховом сравнении. Так, например, незачем имитировать дискретные отражения, запаздывание и уровень которых таковы, что они полностью маскируются прямым звуком или другими отражениями; не нужно также разделять отражения по направлению прихода настолько детально, что их различие по этому признаку выходит за пределы разрешающей способности слуха.

Из большого числа работ, выполненных в Гёттингене методом электроакустического моделирования (главным образом касающихся слышимости запаздывающих отражений), отметим здесь лишь результаты, полученные при исследовании восприятия суммы сигналов с различной степенью когерентности [Л. 38].

Схема эксперимента изображена на рис. 45. Прежде всего нужно заметить, что есть два способа изменения коэффициента корреляции заданных сигналов в широких пределах — от единицы до значений, близких к нулю. Во-первых, возможна пространственная декорреляция сигналов, принимаемых двумя микрофонами в реверберационной камере (РК): с увеличением расстояния между микрофонами сигналы постепенно становятся некогерентными (схема *а* на рис. 45). Во-вторых, декорреляция может быть достигнута путем смещения одного из сигналов во времени; по мере возрастания временно́го сдвига τ между сигналом и его запаздывающим повторением автокорреляционная функция монотонно убывает, т. е. коэффициент когерентности смещенных сигналов стремится к нулю (схема *б*).

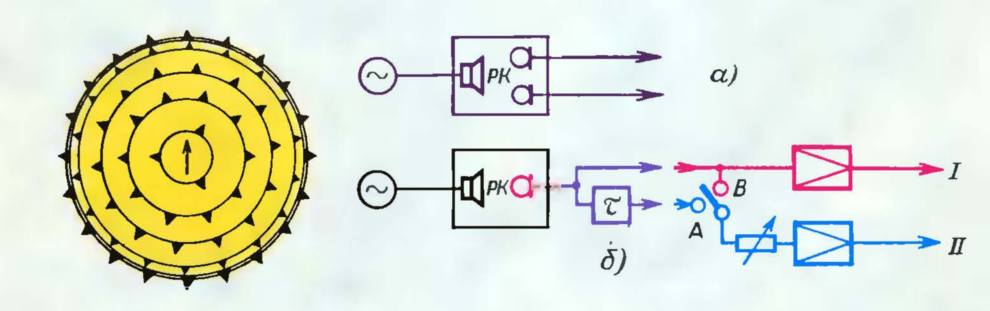


Рис. 44. Рис. 45.

В обоих случаях слушателю в заглушенной камере можно предъявлять для сравнения два варианта сложения сигналов, которые подводятся к двум группам громкоговорителей (*I* и *II*), выбираемых из общей совокупности (рис. 44). В положении *А* переключателя слушатель воспринимает сумму не вполне когерентных (или даже некогерентных) сигналов; в положении *В* к обеим группам подводится один и тот же сигнал и сумма складывается из полностью когерентных составляющих. Группы *I* и *II*, состоящие каждая из двух или трех громкоговорителей, составляются так, чтобы при подведении к ним синфазных сигналов равного уровня кажущийся источник локализовался в одном и том же направлении (именно над головой наблюдателя) для каждой из групп.

Основная задача исследования состояла в определении абсолютного порога заметности (АПЗ) при добавлении второго слагаемого (группа *II*) в зависимости от вида сигнала и от степени когерентности слагаемых при пространственной и при временно́й декорреляции. АПЗ определяется минимальным уровнем добавляемого сигнала *II* (относительно сигнала *I*) независимо от того, по какому признаку слушатель распознает наличие добавки. Исследование показало, что АПЗ понижается (т. е. добавление второго слагаемого распознается при меньшем его уровне) по мере уменьшения коэффициента когерентности. На рис. 46 эта зависимость представлена для случая пространственной декорреляции слагаемых; испытательным сигналом служил отрывок танцевальной музыки, исполнявшейся оркестром, а коэффициент взаимной корреляции измерялся на широкополосном шуме. В верхнем правом углу на рис. 46 изображено размещение громкоговорителей (красные треугольники —группа *I*, синие — группа *II*). По оси абсцисс отложено расстояние *r* (м) между микрофонами в реверберационной камере; ординаты слева дают АПЗ (пунктирная линия), справа дается нормированный коффициент взаимной корреляции ρ, выраженный также в децибелах (10 lg ρ, сплошная линия). Тесная связь АПЗ с мерой пространственной декорреляции обнаруживается с полной отчетливостью. Опуская подробности, отметим, что временна́я декорреляция связана с АПЗ столь же тесно, как и пространственная.

Значительный интерес представляют отмечаемые слушателями различия в звучании суммарного сигнала при когерентном и некогерентном сложении, в особенности в тех случаях, когда коэффициент корреляции нетождественных сигналов еще не настолько мал, чтобы их можно было считать полностью некогерентными. Когда декорреляция обусловлена достаточно малым временным сдвигом, наличие запаздывающего сигнала замечается по изменению тембра, связанному с интерференцией (ср. § 11). При слушании в заглушенной камере это изменение гораздо более заметно, чем в обычных условиях, когда отражения звука делают интерференционную картину нерезкой. При пространственной декорреляции уже

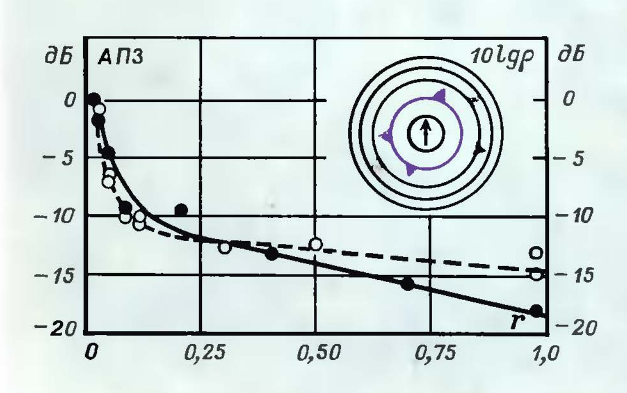


Рис. 46.

нет изменений тембра; различие между когерентным и некогерентным сложением обнаруживается в том, что в первом случае слушатель локализует кажущийся источник по какому-то направлению, зависящему от разности уровней сигналов, тогда как во втором случае звуковое поле представляется слушателю тем более диффузным, чем меньше коэффициент когерентности. Эффект объемности звучания отмечается и при декорреляции, обусловленной смещением во времени, если оно превышает 3 мс; при этом изменение тембра уже перестает быть заметным.

Эти наблюдения поясняют и дополняют соображения, изложенные в § 11, относительно особенностей стереофонического сложения сигналов.

На рис. 47 изображена схема системы моделирования, выполненная в Институте технической акустики в Дрездене, для исследования заметности изменения основных параметров, характеризующих звуковое поле в закрытом помещении [Л. 42]. Выбранная модель была намеренно сделана сильно упрощенной. Помимо прямого звука (канал *1*), моделировалось лишь одно отражение от боковой стены (канал *2*) и одно от потолка (канал *3*); процесс реверберации воспроизводился четырьмя распределенными громкоговорителями, питаемыми по каналам *4—7* некогерентными сигналами от листовых ревербераторов *ЛР* (время искусственной реверберации 2 с). Отражения от боковой стены и от потолка могли с помощью линии задержки *ЛЗ* вводиться с желаемыми запаздываниями относительно прямого сигнала; спектр отражения от боковой стены можно было изменять путем ограничения сверху или снизу с помощью фильтров *Ф* во 2-м канале. Начало реверберационного процесса также могло задерживаться на то или иное время, изменяемое по желанию экспериментатора в достаточно широких пределах.

Помимо исследуемого музыкального сигнала *С* на вход системы можно подавать измерительный сигнал от генератора шума ***ГШ***; уровень этого сигнала возле слушателя в камере измеряется контрольным микрофоном *КМ* и индикатором уровня *У*. Микрофоны в аппаратной *М* и в камере *КМ* предусмотрены для двусторонней связи экспериментатора со слушателем: в прямом направлении через один из громкоговорителей ***Г*** в камере, в обратном — через контрольный громкоговоритель ***КГ*** в аппаратной.

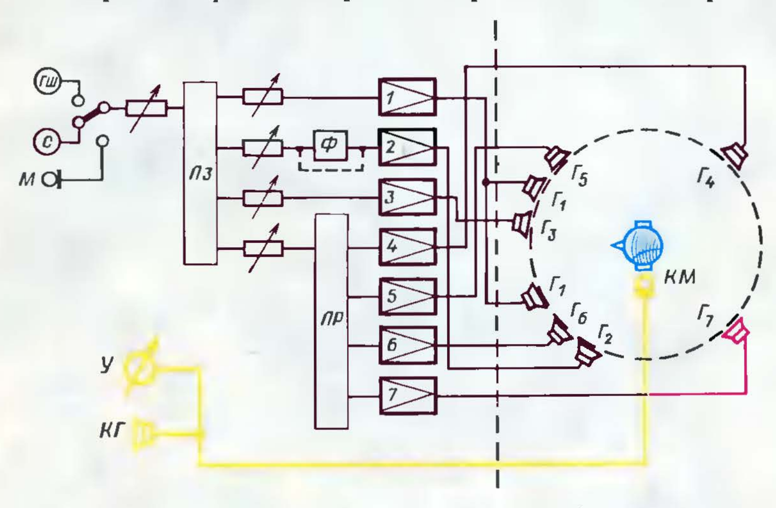


Рис. 47.

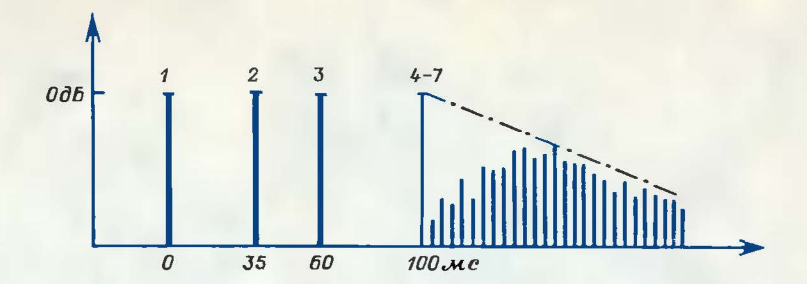


Рис. 48.

В качестве исходной совокупности параметров, по отношению к которой определялись АПЗ их изменения, была выбрана комбинация, представленная на рис. 48. Предполагалось, что при относительно простой структуре эта комбинация удовлетворительно характеризует некоторые средние условия, встречаемые на практике. Уровень реверберирующего сигнала (штрихпунктирная линия) соответствует стационарному режиму и не достигается при воспроизведении испытательного сигнала (отрывок оркестровой музыки Генделя).

Вся воспроизводящая часть системы размещалась в большой заглушенной камере института, где и происходили прослушивания. Полученные при этом статистически значимые величины АПЗ изменений уровня и запаздывания отражений приводятся в табл. 4.

Таблица 4

Спектр отражения	Изменение уровня, дБ	Изменение запаздывания, мс	
		возрастание	уменьшение
От боковой стены:			
без изменений	1,5	7	9
$f_{верхн}$=4 кГц	2,5	11	15
$f_{верхн}$=2 кГц	3,0	16	20
$f_{нижн}$=400Гц	2,5	12	15
От потолка:			
без изменений	2,5/3,5*	12	14

*Два значения относятся соответственно к повышению и к понижению уровня.

В отдельной серии прослушиваний испытуемым предлагалось ответить на вопрос о том, какое именно изменение констатируется ими при сравнении двух вариантов предъявляемого звучания. В ходе испытаний выяснилось, что относительное число правильных ответов не обнаруживает устойчивых закономерностей, так что полученные значения порогов правильной констатации являются частными и не подлежат обобщению. Тем не менее сообщаемые результаты представляют определенный интерес и могут оказаться полезными при оценке приемов звукорежиссерского конструирования акустических обстановок.

В 50 % высказываний повышение уровня отражения от боковой стены правильно распознается при $\Delta N = 2{,}5$ дБ, а при понижении — при $\Delta N = 6$ дБ, тогда как АПЗ составляет в обоих случаях 1,5 дБ. Для констатации повышения уровня отражения от потолка при тех же условиях (50 % правильных ответов) необходимо изменение минимально на 5 дБ; при понижении уровня правильные ответы получаются, по-видимому, лишь чисто случайно. Что же касается изменений запаздывания (Δt), то при сравнительно небольших значениях они воспринимаются как изменения уровня, а не времени прихода. Возможное объяснение этого эффекта иллюстрируется схемой на рис. 49, где пунктирная линия, начинающаяся от прямого сигнала *Пр*, представляет собой график АПЗ в его зависимости от запаздывания отражения *Отр*. Если при неизменном уровне отражение смещается в сторону возрастания задержки, то его превышение над АПЗ получает положительное приращение ΔN; поэтому отражение и воспринимается как более интенсивное. Напротив, при сокращении запаздывания превышение над АПЗ становится меньше и возникает впечатление снижения уровня отраженного сигнала. Для правильного распознавания прироста запаздывания отражения от боковой стены в 50 % ответов понадобилось увеличить задержку на 120 мс; при этом в остальных 50 % суждений отмечалось возрастание громкости или запаздывания отражения от потолка, а не от стены. Уменьшение запаздывания ни разу не распознавалось правильно.

Увеличение временного сдвига начала реверберационного процесса относительно прямого звука лишь в немногих единичных случаях распознавалось как таковое; гораздо чаще при этом отмечалось повышение гулкости. Напротив, при сокращении запаздывания гулкость казалась сниженной.

Субъективная оценка соотношения уровней прямого и диффузного звука была подробно исследована в более ранней работе В. Рейхардта и В. Шмидта [Л. 43], выполненной на той же установке, но с использованием только канала *1* (прямой звук) и каналов *4—7* (диффузная реверберация). Начало реверберационного процесса запаздывало относительно прямого сигнала на 50 мс. Слушателям в заглушенной камере предъявлялись при одинаковом уровне громкости два варианта звучания (все тот же отрывок музыки Генделя), различающиеся значением величины

$$H = 20\lg\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{диф}}},$$

где $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{диф}}$ — эффективные значения звукового давления прямой и диффузной составляющих поля, измеренные на терц-полосе шума со средней частотой 1 000 Гц. После предъявления некоторой пары вариантов с параметрами H и $H + \Delta H$ каждый слушатель должен был сказать, слышит ли он разницу в объемности звучания и какой из двух вариантов кажется ему более объемным и гулким. Правильным является ответ, отмечающий более высокую степень гулкости при $\Delta H < 0$ или ее снижение при $\Delta H > 0$. Такая процедура повторялась при различных значениях исходного параметра H. Общее число испытуемых составило 30 человек. Предварительными

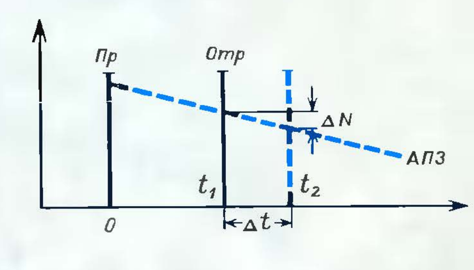


Рис. 49.

опытами было установлено, что при возрастании ΔH число правильных ответов увеличивается в хорошем соответствии с нормальным законом; средним значением порога правильной констатации можно было считать то значение ΔH, при котором относительное число правильных ответов достигало 50%. Зависимость ΔH от H, экспериментально найденная Рейхардтом и Шмидтом, позволила им установить число и положение дифференциальных порогов между двумя крайними ситуациями — полным подавлением прямого звука ($H < -23$ дБ) и полным подавлением диффузной составляющей ($H > 22$ дБ). В этом диапазоне было найдено 14 пороговых единиц или ступеней: от —7 до 0 при $H<0$ и от 0 до 7 при $H>0$ (табл. 5).

Таблица 5

Преобладание диффузной составляющей		Преобладание прямого звука		Преобладание диффузной составляющей		Преобладание прямого звука	
№ ступени	дБ	№ ступени	дБ	№ ступени	дБ	№ ступени	дБ
—7	—23	0	0	—3	—6,5	4	9
—6	—17,5	1	2	—2	—4	5	12
—5	—13	2	4	—1	—2	6	16
—4	—9,5	3	6,5	—0	—0	7	22

15. СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЕ ЗВУКОУСИЛЕНИЕ И АМБИОФОНИЯ

В послевоенное время как в Советском Союзе, так и за рубежом в строительстве общественных зданий наметилась тенденция сооружения залов очень большой вместимости, имеющих многоцелевое или даже универсальное назначение. К числу таких сооружений относится Кремлевский Дворец съездов, большой зал которого имеет объем 50 000 м³ и вмещает более 6 000 человек в партере, амфитеатре и на балконе. Максимальная высота зала составляет 21 м, максимальная ширина — 56 м; наибольшее удаление слушателей от сцены равно 47 м в партере, 52 м в амфитеатре и 62 м на балконе. Одни эти цифры уже дают некоторое представление о сложности акустических задач, связанных с обеспечением оптимальных условий слухового восприятия на всей площади мест, превышающей 4 500 м². Решение значительно осложняется тем, что зал предназначается не только для съездов, конференций и конгрессов, но и для исполнения разнообразных концертных программ, для эстрадных и оперных представлений, наконец, для демонстрации обычных, широкоэкранных и широкоформатных фильмов со стереофоническим звуковым сопровождением [Л. 31].

Размеры и вместимость большого зала Кремлевского Дворца съездов настолько велики, что не только речь или камерная музыка, но и симфоническая музыка, исполняемая оркестром полного состава, не могут звучать в этом зале на сколько-нибудь достаточном уровне без помощи электроакустических средств звукоусиления. Наряду с этим большая величина средней длины свободного пробега звука (свыше 16 м, что соответствует среднему времени пробега около 50 мс) затрудняет, если не исключает, возможность использования естественных отражений. Поэтому принятое техническое решение характеризуется отказом от использования естественной реверберации; на электроакустические системы возлагается как создание прямого звукового поля, так и имитация акустических свойств кон-

цертного зала. Такое решение приводит, во-первых, к необходимости достаточно эффективного заглушения зала (средний коэффициент поглощения не должен быть ниже 0,4 во всем диапазоне звуковых частот); во-вторых, аппаратура для усиления концертной музыки должна иметь очень высокие качественные показатели с тем, чтобы создаваемое ею звучание удовлетворяло наиболее строгим эстетическим требованиям.

Разнообразие форм использования зала исключает возможность успешно решить задачи звукоусиления с помощью одной и той же системы как для речей во время съездов и конгрессов, так и для концертных программ. Это объясняется тем, что условия работы системы и предъявляемые к ней требования в том и другом случае существенно различны.

Система усиления речей нередко должна работать при малых уровнях входного сигнала (например, при выступлениях оратора со слабым голосом); в таких случаях от системы требуется очень большое усиление, однако при сохранении необходимого запаса устойчивости (см. § 6). Поле уровней усиленного сигнала должно обладать высокой степенью однородности с тем, чтобы на всей площади мест одинаково хорошо воспроизводилась та полоса частот, в пределах которой лежит основная часть спектра мощности речевого сигнала. Напомним, что эта полоса не столь широка, как полоса, занимаемая спектром музыкальных звучаний; в частности, при усилении речи допустимо более или менее значительное снижение коэффициента передачи в области низких частот. Далее, для повышения четкости усиливаемой речи нужно, чтобы слушатель получал, помимо прямого сигнала, еще и достаточно большое число ранних его повторений с минимальным запаздыванием при уровнях, сравнимых с уровнем прямого звука.

Система усиления концертных программ работает в иных условиях. Уровень звукового давления в зоне размещения микрофонов значительно выше, чем в случае речи; как правило, система может обеспечить достаточный уровень усиленного сигнала при большом запасе устойчивости. К степени однородности поля уровней прямого сигнала можно не предъявлять особенно строгих требований, поскольку для полноценного звучания музыки нужно, чтобы диффузная составляющая значительно преобладала над прямой. Зато электроакустическая система, имитирующая поле отраженного звука, должна обеспечить не только достаточно высокую диффузность этого поля, но и оптимальное его соответствие характеру исполняемой музыки.

Дело в том, что универсального оптимума архитектурно-акустических условий не существует: предъявляемые к ним требования различны не только для речи и музыки, но и для музыкальных произведений различного вида и стиля. Так, например, в больших залах (>2 000 м^3) оптимум реверберации в области средних частот варьирует от 1,2 с (классическая музыка) до 2,1 с (романтическая музыка); произведения для органа нередко требуют еще более продолжительной реверберации. Таким образом, идеальной звуковой системой нужно считать такую, которая допускала бы возможность оперативного управления акустикой, ее оптимизацию применительно к различным программам.

В соответствии с изложенными соображениями для усиления речей в большом зале Кремлевского Дворца съездов используется распределенная система из 6 000 небольших громкоговорителей, скрытых в спинках кресел. Создаваемое ими поле усиленного сигнала обладает очень высокой однородностью; требуемая плотность запаздывающих сигналов на любом из слушательских мест обеспечивается соответственно большой плотностью размещения громкоговорителей. Их звуковое поле не допускает локализа-

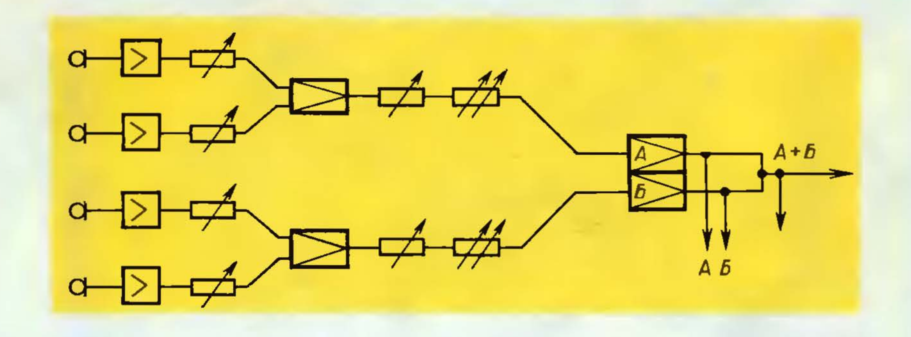


Рис. 50.

ции настоящих его источников, оно непринужденно привязывается к видимому источнику сигнала — к оратору.

Усиление концертных программ осуществляется двумя совместно работающими системами. Одна из них — пятиканальная стереофоническая звуковая система — заканчивается пятью двухполосными громкоговорителями мощностью по 400 Вт каждый, скрытыми за козырьком над порталом сцены. На эту систему возлагается задача создания поля прямого звука. Задачи управления акустикой зала и реализации соответствующего диффузного поля решается с помощью сложной амбиофонической системы, включающей в себе 350 громкоговорителей мощностью по 5 Вт, которые скрытно размещены на стенах и на потолке зала.

Если кресельную систему усиления речей нужно считать функционально детерминированной, то системы стереофонического усиления и амбиофонии являются, конечно, системами со свободным доступом, осуществляемым с пульта звукорежиссера.

На рис. 50 изображена схема одного из пяти каналов звукоусиления. Каждый из этих каналов имеет четыре микрофонных входа, на которые можно подать сигналы от любых микрофонов, выбранных из большого числа устанавливаемых на сцене, авансцене и в оркестровой яме; выбор делается посредством коммутатора с 24 выходами. Сигналы допускают сначала раздельное, а затем попарное регулирование уровня и тембра. Как видно из схемы, каждый из пяти каналов представляет собой, начиная с выходных усилителей пульта звукорежиссера, совокупность двух параллельных каналов (*А* и *Б*), по которым можно передавать либо один и тот же сигнал (в этом случае один из каналов служит резервом для другого), либо два разных сигнала, складывающихся на выходе. Таким образом, исходным материалом для композиции пяти выходных сигналов стереофонической системы служат 20 первичных (входных) сигналов, получаемых от выбранных звукорежиссером микрофонов.

Схема четырехканальной амбиофонической установки изображена на рис. 51. Основным ее элементом является комплекс искусственной реверберации, содержащий реверберационную камеру *РК* объемом около 300 м^3 и два магнитных реверберагора *М* с девятью воспроизводящими головками и четырьмя выходными каналами. Время искусственной реверберации изменяется посредством регуляторов *Т*. Ревербераторы могут создавать либо бесконечную последовательность эхо-сигналов (благодаря обратной связи с одной из головок), либо конечный набор дискретных повторений входного сигнала. На первый канал подаются сигналы с первых

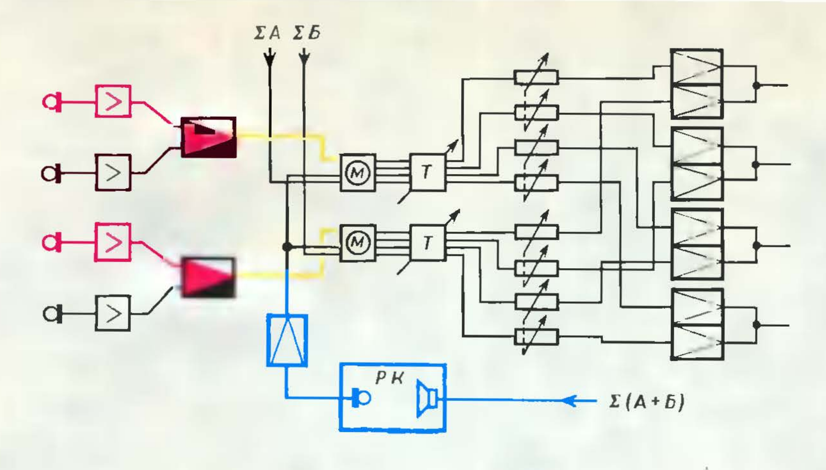


Рис. 51.

двух головок; следующие две пары головок работают соответственно на второй и третий каналы; сигналы с последних трех головок подаются на четвертый канал. Таким образом, запаздывание головного эхо-сигнала возрастает от одного канала к другому. Распределенные в зале громкоговорители амбисфонической системы подключены к этим каналам с таким расчетом, чтобы по мере удаления от сцены возрастало число громкоговорителей, питаемых от канала с большей задержкой и, следовательно, с меньшим уровнем головного эхо-сигнала. Группирование громкоговорителей зала по каналам с разной задержкой головного эхо-сигнала способствует естественности диффузного звучания, имитируемого амбиофонической системой. Магнитный реверберотор, простейшим образом решающий задачу такого группирования, имеет в этом отношении определенное преимущество перед листовым ревербератором или реверберационной камерой. Вместе с тем магнитные ревербераторы не свободны от серьезных недостатков, связанных, во-первых, с регулярностью временно́й структуры последовательности эхо-сигналов и, во-вторых, с гребенкообразной формой частотной характеристики коэффициента передачи при наличии обратной связи.

Более совершенное решение дает сочетание магнитных ревербераторов с реверберационной камерой. Входной сигнал, воспроизводимый громкоговорителями в камере, принимается находящимся в ней микрофоном. Получаемый от него реверберирующий сигнал может вводиться в зал с тем или иным запаздыванием, для чего можно использовать один из магнитных ревербераторов, работающий в режиме линии задержки.

Такая схема допускает возможность выбора разнообразных режимов работы амбиофонической системы. В частности, можно получать от магнитного ревербератора, работающего без обратной связи, лишь небольшое число ранних эхо-сигналов, имитирующих начальную (дискретную) часть естественного реверберационного процесса; следующее за нею слитное затухание создается в реверберационной камере. Возможность раздельного и независимого регулирования дискретной и непрерывной частей искусственно создаваемой реверберации представляет известный интерес, поскольку ранние дискретные отражения заметно влияют на прозрачность полифонической музыки, тогда как непрерывная часть затухающего процесса определяет так называемую объемность звукового образа. Амбиофоническая установка позволяет работать и без реверберационной камеры, используя

(по отдельности или совместно) магнитные ревербераторы с обратной связью. Оперативное управление режимами работы системы осуществляется звукорежиссером, который может выбрать оптимальное в тех или иных условиях время реверберации, ту или иную схему обратных связей в ревербераторах и, наконец, подобрать оптимальные уровни выходных сигналов. Во многих случаях оптимальные рабочие режимы устанавливаются звукорежиссером в ходе микрофонных репетиций (обычно с участием дирижера, хормейстера, художественного руководителя или постановщика). Во время исполнения звукорежиссер, сидя за пультом, имеет перед глазами партитуру и программу управления режимами систем стереофонического усиления и амбиофонии, так как при усилении оперных постановок или концертов с разнообразной программой рабочие режимы могут изменяться в довольно широких пределах.

Существуют различные возможности выбора и ввода исходных сигналов в комплекс искусственной реверберации. Во-первых, сумма всех пяти выходных сигналов системы стереофонического усиления $[\Sigma (A + Б)]$ может быть подана на громкоговорители реверберационной камеры и с желаемыми задержками, создаваемыми одним из ревербераторов, распределена по громкоговорителям зала; на второй ревербератор, работающий без обратной связи, можно при этом подавать сигнал ΣA или $\Sigma Б$. Во-вторых, в тех случаях, когда по параллельным каналам A и $Б$ передаются несовпадающие сигналы, можно, подавая на входы ревербераторов сигналы ΣA и $\Sigma Б$, использовать преимущества раздельной их обработки. Так, например, при исполнении оперы можно одновременно реализовать в зале две разные акустики — одну для певцов, другую для оркестра, имея в виду, что для этих двух компонентов оперной постановки оптимальные условия существенно различны. Наконец, в-третьих, звукорежиссер имеет возможность выбрать из числа микрофонов сцены и оркестра любые четыре, выходные сигналы которых могут непосредственно вводиться в комплекс искусственной реверберации (напомним, что коммутатор микрофонов имеет 24 выхода, из которых для стереофонического звукоусиления используются только 20).

О возможностях управления акустикой зала посредством амбиофонической системы можно судить по ее влиянию на время реверберации. На рис. 52 диапазон такого влияния определяется заштрихованной областью, нижняя граница которой представляет частную характеристику собственной реверберации зала, а верхняя — время реверберации, максимально достижимое при использовании электроакустических средств.

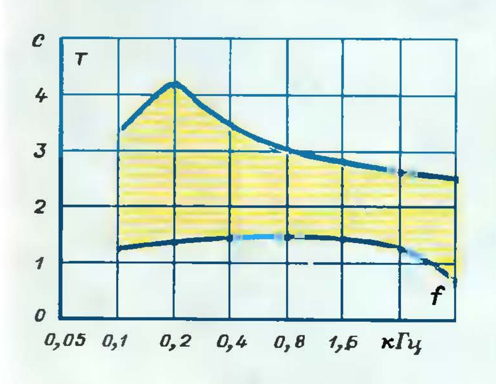


Рис. 52.

Помимо описанных систем усиления речей и концертных программ электроакустическое оборудование большого зала Кремлевского Дворца съездов включает в себя системы звукового (в том числе и стереофонического) сопровождения кинофильмов, систему звуковых эффектов, системы записи и воспроизведения звука, систему синхронного перевода речей и др. Некоторое представление о сложности звукотехнического оборудования зала дает рис. 53, где схематически изображено размещение громкоговорителей различных систем. Система в целом включает:

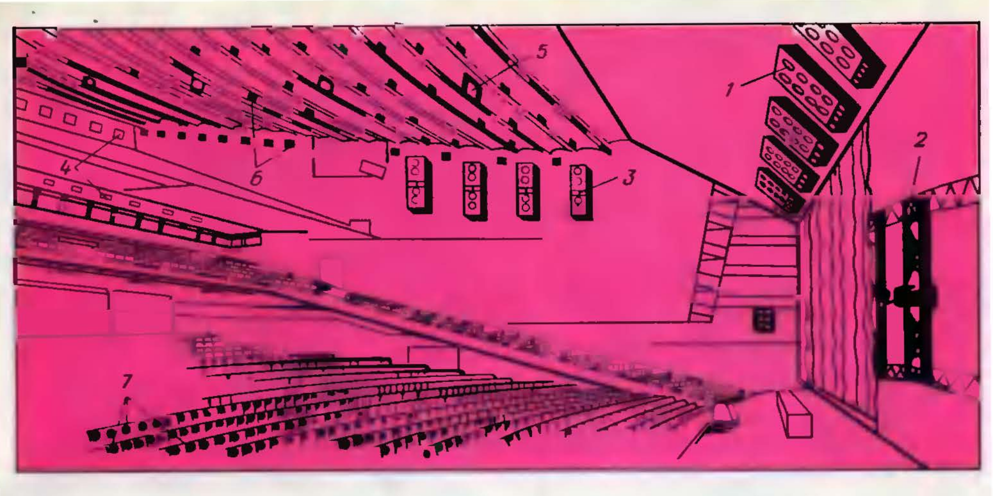


Рис. 53.

пять портальных громкоговорителей *1* для стереофонического усиления концертных и оперных программ;

пять заэкранных громкоговорителей *2* для звукового сопровождения широкоформатных и панорамных фильмов, воспроизводимого совместно с громкоговорителями на боковых стенах *3*, на задней стене *4* и на потолке *5*;

распределенную по периметру зала и на потолке амбиофоническую систему громкоговорителей *6* для оперативного управления акустикой зала;

распределенную систему кресельных громкоговорителей *7* для усиления речей.

Разнообразие форм использования зала неизбежно приводит к возрастанию числа электроакустических и усилительных устройств. В связи с этим одним из основных принципов технического решения явился принцип взаимозаменяемости функционально сходных элементов различных звуковых систем, т. е. возможность их использования в различных видах работы. Последовательное проведение этого принципа позволило не только сократить число однородных элементов звукотехнического комплекса, но и обеспечить наиболее экономичное решение задачи надежного резервирования.

Остается добавить, что в схеме электроакустического оборудования предусмотрены линии выдачи сигнала внешним потребителям — радиовещанию и кинохронике, чем устраняется необходимость дополнительной установки большого числа микрофонов на пульте оратора, на столе президиума и на сцене. Потребители получают сигнал на микрофонном уровне (—70 дБ); это дает им возможность независимой обработки сигнала в соответствии со специфическими условиями его дальнейшего прохождения по внешним каналам передачи.

Технические решения, принятые в звукотехническом комплексе Кремлевского Дворца съездов, были разработаны Б. Г. Белкиным, И. М. Болотниковым, А. Н. Качеровичем, В. В. Фурдуевым, А. Р. Пригожиным, Р. М. Кашерининовым, Н. Т. Гордиенко, М. И. Болтянским и Е. М. Дубровиной. Руководителем работы был А. А. Хрущев., В 1962 г. работа была удостоена Ленинской премии.

16. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ

Исправление акустики зала «Ройял Фестивал Холл»

Зал «Ройял Фестивал Холл» (РФХ) в Лондоне, открытый для публики в 1952 г., является одним из самых больших концертных залов в западноевропейских странах (объем 22 000 м³, вместимость 3 000 человек). Опыт первых концертных сезонов привел специалистов к заключению, что время реверберации в области частот ниже 1 000 Гц меньше оптимального, во всяком случае для симфонической музыки. Устранение этого недостатка путем строительно-акустических мероприятий было признано нецелесообразным. Поэтому владелец здания — Совет лондонского графства — дал согласие на попытку лучшить акустику зала посредством регенеративной электроакустической системы, предложенной в 1961 г. П. Паркином [Л. 39].

Идея П. Паркина заключается в использовании акустической обратной связи с системах, содержащих микрофон, усилитель и громкоговоритель, излучение которого прямо или косвенно действует на микрофон. Такая система, установленная в закрытом помещении, существенно влияет на процесс реверберации и, в частности, на его длительность. Действительно, те моды собственных колебаний воздушного объема, для которых обратная связь оказывается положительной, затухают медленнее, чем при выключенной системе; напротив, моды, для которых обратная связь отрицательна, затухают быстрее. Влияние системы на скорость затухания собственных колебаний тем значительнее, чем больше модуль комплексного коэффициента акустической обратной связи, пропорциональный усилению в электроакустическом канале. При некоторых ограничительных условиях время реверберации T_β для какой-либо определенной моды определяется соотношением

$$T_\beta \approx T/(1-\beta\cos\varphi), \qquad (37)$$

где β и φ — модуль и фазовый угол коэффициента обратной связи, а T — время реверберации при $\beta=0$, т. е. при выключенной системе. Приближенная формула (37) тем точнее, чем больше T и чем меньше глубина обратной связи. Из формулы видно, что акустическая обратная связь замедляет затухание, если фаза заключена в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$, и,напротив, укорачивает реверберацию, когда $\pi/2<\varphi<3\pi/2$.

Влияние акустической обратной связи на реверберацию отчетливо заметно при работе системы звукоусиления с недостаточным запасом устойчивости (см. § 6). Возникающие при этом регенеративные искажения проявляются, в частности, в том, что отзвук приобретает тональный характер, напоминающий звон. Этот хорошо известный эффект, значительно ограничивающий возможность повышения уровня усиливаемого сигнала, в высшей степени нежелателен и вынуждает принимать все меры к подавлению обратной связи в системах звукоусиления.

Чтобы обезвредить этот эффект и использовать его для акустической коррекции, П. Паркин предложил систему, состоящую из большого числа остро настроенных электроакустических каналов, каждый из которых работает в очень узкой отведенной для него полосе частот. Схема канала изображена на рис. 54. Микрофон M находится в полости резонатора Гельмгольца в торце подвижного поршня, служающего для постройки системы. В области низких частот резонатор обладает высокой добротностью, что придает ему свойства узкополосного фильтра и вместе с тем повышает уровень звукового давления в полости на 25—30 дБ на частоте резонанса. Усилитель

с выходной мощностью в 3 Вт содержит фазовращатель *ФВ*, позволяющий регулировать фазу акустической обратной связи. Громкоговоритель помещается в ящике, конструкция которого допускает возможность настройки системы на частоту канала; при этом чувствительность громкоговорителя в области резонанса может быть повышена на 8—10 дБ. Избирательность канала в целом такова, что ширина резонансной кривой на уровне половинной мощности в области низких частот составляет примерно 3 Гц.

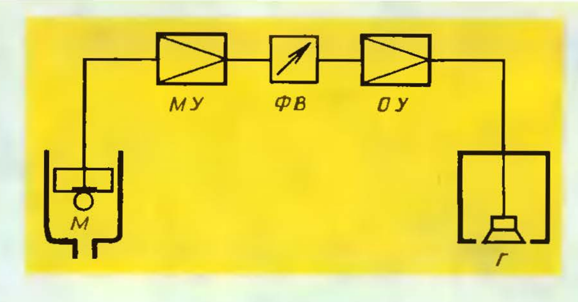


Рис. 54.

На первом этапе работы было решено ограничить акустическую коррекцию РФХ областью частот от 70 до 340 Гц. Было принято, что каждый канал должен работать в полосе шириной в 3 Гц. Отсюда определилось необходимое число каналов, именно 89. Очевидно, что при столь большом числе работающих каналов только высокая степень избирательности может гарантировать устойчивость регенеративной системы в целом. Если бы все 89 каналов работали в перекрывающихся областях частот, то из-за перекрестных обратных связей порог самовозбуждения системы понизился бы настолько, что она оказалась бы неработоспособной.

Микрофоны и громкоговорители были скрытно размещены над подвесным потолком; имеющиеся в нем отверстия были использованы для вывода горловин резонаторов с микрофонами. Громкоговорители размещались главным образом в головной части зала, микрофоны, напротив, в более или менее значительном удалении от эстрады. Расстояние между микрофонами и громкоговорителем одного и того же канала лежало в пределах от 15 до 22 м и было ориентировано в диагональном направлении. Оптимальное место микрофона при заданном положении громкоговорителя того же канала определялось экспериментально: громкоговоритель возбуждался синусоидальным током с частотой, назначенной для данного канала, причем в ряде точек возможной установки микрофона измерялся уровень принимаемого им сигнала. Микрофон окончательно устанавливался там, где этот уровень оказывался максимальным. В этих условиях можно было считать, что как громкоговоритель, так и горловина резонатора с микрофоном располагаются в пучностях колебательной скорости соответствующей моды собственных колебаний. Настройка канала на максимально положительную обратную связь осуществлялась следующим образом: на вход оконечного усилителя *ОУ* подавалось синусоидальное напряжение с канальной частотой; фаза выходного напряжения микрофонного усилителя *МУ* изменялась посредством фазовращателя *ФВ* до тех пор, пока оно не становилось синфазным с напряжением на входе оконечного усилителя, после чего оба усилителя соединялись каскадно.

Достигнутые результаты иллюстрируются частотными характеристиками реверберации, представленными на рис. 55. Кривая *А* измерена в заполненном зале РФХ при выключенной электроакустической системе, кривая *Б* — в тех же условиях, но при работе системы в первоначально установленном для нее режиме. Из приведенных характеристик видно, что регенеративная система проявляет себя и за пределами отведенного для нее частотного диапазона. По мнению Паркина, возрастание времени реверберации в

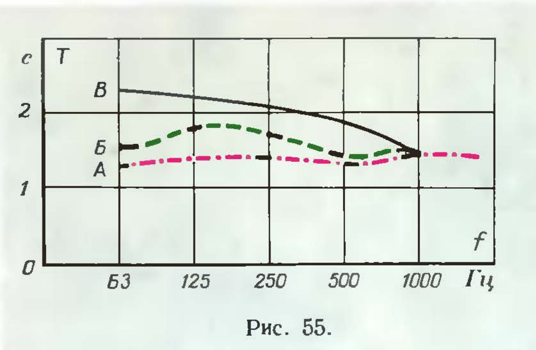


Рис. 55.

области частот выше 340 Гц может объясняться резонансными явлениями в полости резонаторов, когда их размеры становятся сравнимыми с длиною волны.

Небезынтересна история введения многоканальной системы акустической коррекции в повседневную эксплуатацию. Не только о подготовке системы и о ее монтаже в РФХ, но даже о намерении предпринять коррекцию знали первоначально лишь очень немногие. Работы по монтажу и предварительной настройке были закончены в марте 1964 г. Затем в течение некоторого времени система включалась на репетициях и концертах без ведома исполнителей и слушателей, причем время реверберации увеличивалось постепенно от одного концерта к другому до тех пор, пока не получилась характеристика, предполагаемая оптимальной (кривая Б на рис. 55). В таком режиме система работала на ряде концертов. Только в мае 1964 г. факт наличия акустической коррекции был предан гласности. Посетителям и исполнителям было предложено сообщить свое мнение о результатах коррекции. Некоторые из постоянных посетителей концертов в РФХ вообще не заметили разницы; другие отмечали более или менее ощутимое улучшение акустики зала. Среди исполнителей положительную оценку дали некоторые дирижеры (Дж. Барбиролли, А. Боулт, Я. Кубелик). Особенно хвалебную оценку дал И. Менухин, сказав, что «достигнуто коренное улучшение, обеспечивающее замечательную теплоту звучания струнных и духовых инструментов, отчетливо слышимую не только на эстраде, но и в зале».

Положительная оценка достигнутых результатов и опыт успешной эксплуатации системы электроакустической коррекции в течение ряда лет (1965—1969) побудили к расширению частотного диапазона коррекции и вместе с тем к пересмотру аппаратурных решений [Л. 40]. В настоящее время система содержит 172 канала, занимающих диапазон от 58 до 700 Гц. Интервалы между канальными частотами составляют: 2 Гц при частотах ниже 100 Гц, 3 Гц в области 150—180 Гц, 4 Гц в области 180—300 Гц и 5 Гц при более высоких частотах. В нижней части диапазона коррекции (до 100 Гц) каждому каналу отведена по-прежнему одна частота; в области более высоких частот каждый канал рассчитан уже на две частоты, имея общий оконечный усилитель (20 Вт) при двух предварительных усилителях с независимой регулировкой уровня и фазы выходного сигнала. Поскольку при частотах выше 300 Гц не удавалось реализовать резонатор с добротностью порядка 30, канальные микрофоны были размещены не внутри резонаторов Гельмгольца, а в конце четвертьволного отрезка трубы. Недостаток места и расширение рабочего диапазона частот заставили отказаться от использования резонансных ящиков для размещения громкоговорителей.

Принятые решения побудили вернуться и к вопросу об оптимальной характеристике реверберации. Тщательная настройка системы, которую во время репетиций можно было проверять и уточнять путем сравнения звучаний при включенной и при выключенной системе коррекции, привела к выбору оптимума, представленного характеристикой *В* на рис. 55. Сделанный выбор отличается от ранее принятого не только расширением диапазона, но и предпочтением более продолжительной реверберации на низких частотах.

В концертном сезоне 1968—1969 гг. Г. Караян, дирижировавший в РФХ двумя концертами оркестра берлинской филармонии, сказал, что по его впечатлению откорректированная акустика РФХ является, возможно, наиболее совершенной среди концертных залов всего мира.

Оценивая систему коррекции зала РФХ с технологической и экономической точки зрения, нужно сказать, что несмотря на обилие необходимой аппаратуры систему нельзя считать чрезмерно дорогой, поскольку можно не предъявлять особенно строгих требований к качеству микрофонов и громкоговорителей, работающих каждый в очень узкой полосе частот. Во всяком случае стоимость строительно-акустических мероприятий с тем же эффектом едва ли могла оказаться ниже.

Заметим в заключение, что осуществленную в РФХ систему коррекции нет оснований называть системой искусственной реверберации. Реверберация в зале как с коррекцией, так и без нее остается естественной: это суперпозиция большого числа одновременно затухающих колебаний воздушного объема зала. Особенность откорректированного процесса заключается лишь в том, что показатели затухания уменьшены благодаря регенерации звуковой энергии. Эту особенность выражает термин «система поддерживаемых резонансов» (assisted resonance), предложенный П. Паркином для обозначения регенеративного метода воздействия на акустические свойства зала.

Электроакустическое подавление реверберации.

Соображения, относящиеся в формуле (37), наводят на мысль о том, нельзя ли превратить многоканальную систему поддерживаемых резонансов в систему подавляемых резонансов (с прямо противоположным назначением) простой перестройкой фазовращателей в каждом из каналов с переменой знака обратной связи. Возможность электроакустического подавления реверберации представила бы несомненный интерес, так как в практике строительства больших залов общественного назначения избыточная реверберация в области низких частот звукового диапазона относится к числу чаще всего встречающихся дефектов, не всегда и не легко поддающихся устранению строительно-акустическими средствами.

Приближенная формула (37) еще не дает уверенности в эффективности электроакустических средств; задача нуждается в углубленном анализе с более точной оценкой ожидаемого эффекта. При этом нужно иметь в виду, что статистические методы расчета, обычно применяемые в задачах архитектурной акустики, здесь не могут привести к решению, требующему внимательного учета фазовых соотношений.

Как показал С. Э. Корман [Л. 11—13], достаточно строгое теоретическое решение можно получить для одномерной системы, например для трубы. Пусть на одном конце трубы (рис. 56) работает излучатель *И* с поршневой диафрагмой, а на другом конце звуковая энергия частично поглощается нагрузкой *Z* с чисто активным акустическим сопротивлением. Рассмотрим сначала стационарный волновой процесс в трубе, возбуждаемой излучателем на одной из ее собственных частот; канал электроакустической обратной связи,

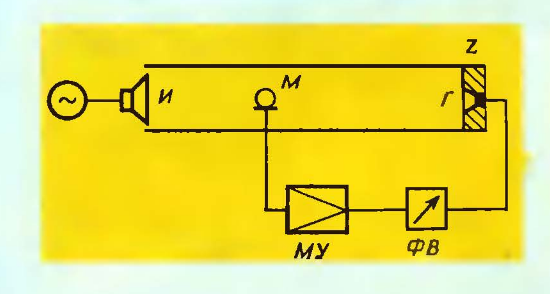


Рис. 56.

начинающийся с микрофона M и кончающийся громкоговорителем $Г$, пока будем предполагать выключенным. В установившемся режиме в трубе будут распространяться две плоские волны: прямая, бегущая от излучателя к нагрузке, и отраженная от нее, бегущая в обратном направлении. При прочих равных условиях амплитуда отраженной волны будет зависеть от коэффициента отражения R на конце трубы. После выключения излучателя начнется реверберация: волновой процесс будет затухать со скоростью, тем большей, чем меньше коэффициент отражения R. При включении канала обратной связи волна, излучаемая на его выходной стороне, в стационарном режиме будет складываться с отраженной волной, усиливая или ослабляя ее в зависимости от фазовых соотношений; мера взаимодействия определяется, очевидно, глубиной и фазой обратной связи. Формально можно считать, что включение обратной связи эквивалентно замене нагрузки Z с коэффициентом отражения R некоторой другой нагрузкой с коэффициентом отражения R_β таким, чтобы отраженная от нее волна совпадала по амплитуде и фазе с суммой двух волн — отраженной от Z и излучаемой громкоговорителем $Г$. Процесс реверберации в трубе при включенной обратной связи будет определяться эквивалентным коэффициентом отражения R_β, не совпадающим с R, и в общем случае комплексным. Выполненный С. Э. Кофманом анализ показал, что

$$R_\beta = \frac{R + \beta\frac{1-R}{1}e^{j\varphi}}{1-\beta\frac{1-R}{2}e^{j\varphi}}, \tag{38}$$

где β и φ — модуль и аргумент безразмерного коэффициента передачи сигнала по петле обратной связи.

Рассмотрим простейшие случаи действительно обратной связи — положительной ($e^{j\mu}=1$) и отрицательной ($e^{j\mu}=-1$).

В первом случае эквивалентный коэффициент отражения равен:

$$R_\beta = \frac{R + \beta\frac{1-R}{2}}{1-\beta\frac{1-R}{2}}. \tag{39}$$

Как нетрудно видеть, $R_\beta \to 1$ при $\beta \to 1$. Это обозначает, что когда усиление в канале обратной связи приближается к критическому, потеря энергии в нагрузке Z все в большей мере компенсируется излучением громкоговорителя $Г$. Процесс реверберации при этом замедляется; в пределе потеря энергии полностью компенсирована и время реверберации становится бесконечным, иначе говоря, система переходит в режим стационарных автоколебаний. Факт этот, конечно, хорошо известен, так что для случая положительной обратной связи формула (38) не дает почти ничего нового.

Зато при отрицательной обратной связи, когда

$$R_\beta = \frac{R - \beta\frac{1-R}{2}}{1+\beta\frac{1-R}{2}}, \tag{40}$$

зависимость R_β от β обнаруживает очень интересные особенности. С возрастанием глубины отрицательной обратной связи R_β убывает; легко убедиться в том, что R_β обращается в нуль при $\beta=\beta_1=2R/(1-R)$. В этих условиях волна, отраженная от Z, гасится волной, излучаемой гром-

коговорителем Γ в противофазе; дело обстоит так, как если бы нагрузка на конце трубы полностью поглощала падающую на нее энергию. Очевидно, что в интервале $0 \leqslant \beta \leqslant \beta_1$ время реверберации уменьшается от T до нуля (T — время собственной реверберации без обратной связи). При дальнейшем увеличении глубины обратной связи ($\beta > \beta_1$) эквивалентный коэффициент отражения R_β, став отрицательным, растет по абсолютной величине. Перемена знака коэффициента отражения говорит о том, что фаза отраженной волны изменяется на противоположную; физическая сущность явления сводится к тому, что излучаемая в противофазе волна не только в состоянии погасить отраженную от Z, но и сохраняет некоторый некомпенсированный остаток, эквивалентный волне, отраженной с обратным знаком. Конечно, это приводит и к соответствующему изменению фазы обратной связи, которая превращается из отрицательной в положительную несмотря на то, что условие $e^{i\mu} = -1$ остается в силе. В соответствии с этим в интервале $\beta_1 < \beta < 1$ время реверберации T_β начинает возрастать и при $R_\beta \to -1$ возрастает неограниченно. Это значит, что система снова теряет устойчивость и переходит в режим генерации.

На рис. 57 изображено семейство кривых, представляющих зависимость R_β от β при различных значениях R. Кривые в правой части графика построены по формуле (40) и относятся к той области, где акустическая обратная связь положительна при любых значениях β и R. Область, лежащая слева от оси ординат, соответствует отрицательной обратной связи при $R_\beta > 0$ и положительной при $R_\beta < 0$. Более наглядную картину действующих здесь закономерностей дает рис. 58, изображающий время реверберации в функции от β при разных величинах T. Переход от одного способа изображения к другому соответствует соотношению

$$\frac{T_\beta}{T} = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(1-\alpha_\beta)} = \frac{\ln R}{\ln|R_\beta|}, \tag{41}$$

которое определяет время реверберации в приближении Эйринга ($\alpha = 1 - R^2$ коэффициент поглощения звука нагрузкой на конце трубы).

При комплексной обратной связи зависимость времени реверберации от β становится более сложной; ее расчет требует довольно громоздких вычис-

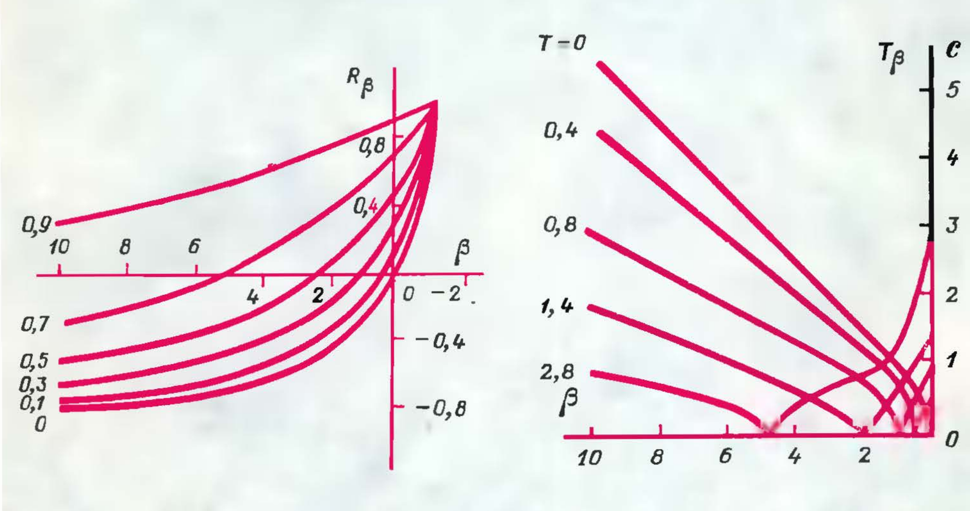


Рис. 57. Рис. 58.

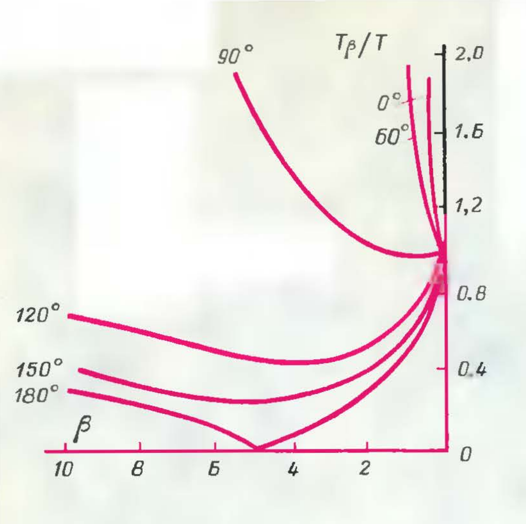


Рис. 59.

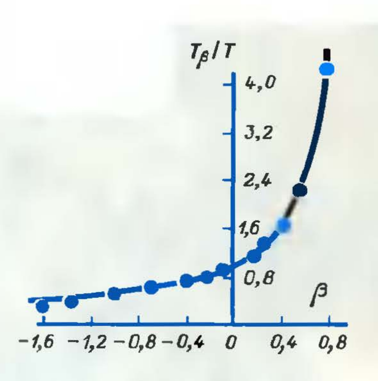


Рис. 60.

лений. В качестве конкретного примера получающихся результатов на рис. 59 представлен характер этой зависимости при $R=0{,}7$. Параметром семейства кривых является фаза φ комплексного коэффициента обратной связи. Анализ показывает, что при комплексной связи T_β нигде не обращается в нуль, а область значений **β**, в пределах которой $T_\beta<T$, значительно сокращается при $\varphi\to\pi/2$.

Возможность распространить выводы одномерной теории на процесс реверберации в помещениях подтверждается измерениями, сделанными Кофманом в реверберационной камере с объемом около 130 м³. Результаты, представленные на рис. 60, свидетельствуют о том, что теория подтверждается измерениями не только качественно, но и количественно: действительно, точки, соответствующие измеренным значениям, хорошо ложатся на кривую, построенную по формулам (41) и (38).

Обращаясь к перспективам практического использования возможности электроакустического подавления реверберации в больших залах, нельзя не признать, что этот путь заслуживает серьезного внимания. Из приведенных результатов следует, что многоканальная система коррекции оказывается особенно эффективной при больших значениях T, т. е. как раз в тех случаях, когда подавление реверберации становится необходимым. Возможность острой настройки каналов позволяет приблизить φ к 180°, тем самым избегая осложнений, обусловленных комплексностью электроакустической обратной связи.

17. СТЕРЕОФОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЗВУКОВОМ КИНО

Стереофоническое звуковое сопровождение кинопоказа стало реальным техническим фактом лишь со времени появления фильмов, предназначенных для демонстрации на большом экране — широкоэкранных и широкоформатных.

Широкоэкранными принято называть фильмы на 35-мм пленке, снимаемые и демонстрируемые с использованием специальной анаморфотной оптики. При съемке фильма такая оптика сужает изображение в горизонталь-

ном направлении, оставляя все вертикальные размеры неизменными. Проекционная оптика восстанавливает горизонтальные размеры путем соответствующего растяжения в направлении ширины кадра. При этом на экране получается изображение с соотношением сторон 2,35:1 (вместо обычного 1,37 : 1).

Если широкоэкранный фильм должен иметь стереофоническое звуковое сопровождение, то оно подготовляется в форме 4-дорожечной фонограммы, получаемой на 35-мм перфорированной магнитной ленте в ходе обработки и перезаписи первичного звукового материала. После печати изображения на фильмокопию наносят путем полива четыре магнитных дорожки — справа и слева от каждого из двух рядов перфорации. Четыре сигнала стереофонического звучания перезаписываются на эти дорожки с уже подготовленной магнитной фонограммы.

На рис. 61 изображена принципиальная схема стереофонического воспроизведения звука при демонстрации широкоэкранного фильма. Сигналы M_1—M_4 получаются с магнитной фонограммы, совмещенной с изображением; три из них (M_1—M_3) воспроизводятся заэкранными громкоговорителями — соответственно левым *Л*, центральным *Ц* и правым *П*, тогда как сигнал M_4 по так называемому каналу звуковых эффектов *КЭ* подводится к системе из 8—12 громкоговорителей, размещенных на стенах зала. Такую форму использования четырех каналов стереофонического сопровождения фильма будем обозначать символом 3+1.

Широкоэкранный фильм с монофоническим сопровождением имеет обычную дорожку фотографической записи; сигнал, получаемый от фотоэлемента *Ф*, воспроизводится звукоблоком нормального типа. В этом случае панель коммутации *ПК* позволяет отключить канал эффектов и подать воспроизводимый моносигнал на экранные громкоговорители, соединенные параллельно.

Переоборудование кинотеатра, необходимое для показа широкоэкранных фильмов, не слишком затруднительно: достаточно заменить экран и оснастить проекторы анаморфотной оптикой. Гораздо более сложным оказывается переход на стереофоническое воспроизведение. Для этого необходимы блок магнитных головок, четыре канала предварительного и оконечного уси-

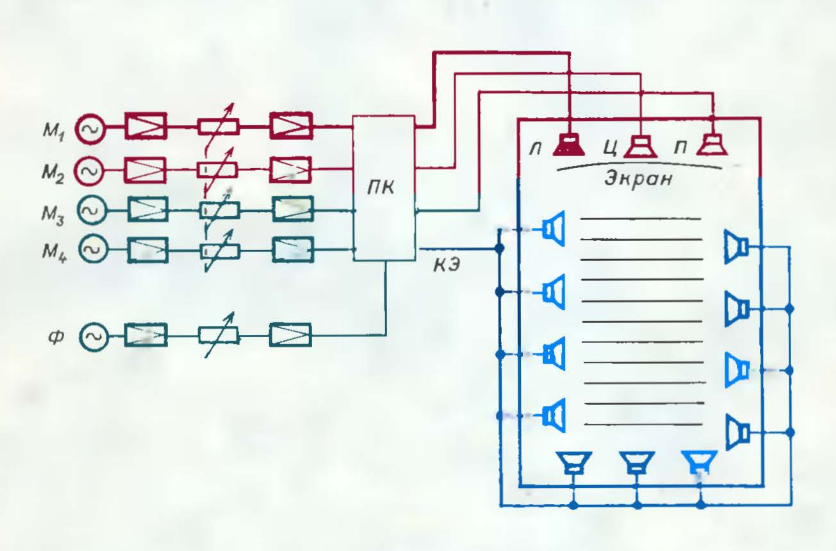


Рис. 61.

ления и полный комплект громкоговорителей в соответствии с воспроизведением сигналов по схеме 3+1. Неудивительно, что число кинотеатров, допускающих демонстрацию широкоэкранных фильмов с монофоническим сопровождением, стало значительно превышать число тех, где, кроме того, есть и возможность воспроизводить стереофоническое звучание. Возникла необходимость выпуска двух видов широкоэкранных фильмокопий: 1) с четырьмя магнитными дорожками с записью стереофонического сопровождения и 2) с одной дорожкой фотографической записи, представляющей монофонический вариант.

Не нужно думать, что изображение, даваемое широкоэкранным фильмом, может содержать больше информации, чем обычный кадр на 35-мм пленке. Можно показать [Л. 6], что с учетом некоторой разницы вертикальных размеров кадра и снижения разрешающей способности, связанного с применением анаморфной оптики, информационные емкости анаморфированного и обычного кадров почти одинаковы. Существенный выигрыш достигается зато в широкоформатном фильме на 70-мм пленке: информационная емкость возрастает здесь в 3,4 раза соответственно соотношению площадей широкоформатного и обычного кадров. Такое возрастание не только значительно повышает оптическое качество изображения, но и позволяет найти новые художественно-постановочные приемы, новые выразительные средства киноискусства.

Заметим, что несколько вогнутый экран широкоформатного кинотеатра занимает практически всю головную часть зала; благодаря этому зрители (в особенности в центральной зоне площади мест) чувствуют себя вовлеченными в события и обстановку, демонстрируемые на экране. Это ощущение называют эффектом соучастия.

Широкоформатные фильмы демонстрируются с 6-канальным звуковым сопровождением. Шесть магнитных дорожек размещаются на 70-мм фильмокопии так, как это показано на рис. 62. Сигналы, записанные на дорожках *1—5*, предназначаются для воспроизведения пятью заэкранными громкоговорителями; шестой канал, заканчивающийся распределенной системой зальных громкоговорителей, может использоваться для создания звуковых эффектов. Такой схеме распределения шести каналов звукового сопровождения присвоим обозначение 5+1.

Так как число кинотеатров, оборудованных для показа широкоформатных фильмов, ограничено, то приходится выпускать эти фильмы также в широкоэкранном и в обычном вариантах. В первом случае изготовление 35-мм копий осуществляется путем оптической печати с анаморфированием; во втором случае печати предшествует так называемый выбор по полю. На площади широкоформатного кадра выбирают часть, информативно наиболее представительную, с размерами, принятыми для кадра 35-мм фильмокопий; выбор делается при просмотре оригинала на специальном просмотровом столе, когда составляют рабочий паспорт выкопировки. В обоих случаях стереофонии уже нет: 6-канальное сопровождение широкоформатного фильма сводится в монофонический вариант, представленный фотографической дорожкой записью на 35-мм копии.

Отметим, наконец, что немногие фильмы, выпущенные для панорамного кинематографа, имели 9-канальное звуковое сопровождение, записанное на отдельной 35-мм магнитной ленте, транспортирование которой синхронизируется с кинопроекций. В круговой кинопанораме семь каналов заканчиваются заэкранными громкоговорителями, размещенными по периметру зала, один канал передает сигнал, воспроизводимый громкоговорителями на потолке; наконец, имеется еще один канал для специальных звуковых эф-

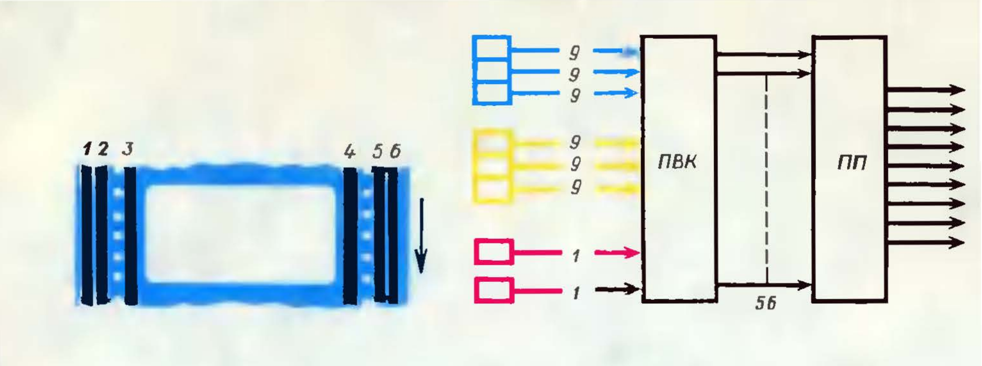


Рис. 62.

Рис. 63.

фектов, создаваемых «подпольными» низкочастотными громкоговорителями. В обычной кинопанораме 9 каналов распределялись по схеме 5+4.

Подготовка многоканального звукового сопровождения фильма и решение возникающих при этом художественных задач режиссуры требуют наличия достаточно сложных устройств, благодаря которым сквозной звуковой тракт становится системой с широкими возможностями свободного доступа. Так как композиция сигналов выполняется, как правило, при одновременной демонстрации изображения, то устройства перезаписи включают не только разнообразное звукотехническое оборудование, но и кинопроекционную аппаратуру с синхронно-синфазным приводом. Высокая стоимость осуществления и обслуживания столь сложных технологических комплексов приводит к необходимости централизации работ по подготовке многоканальных фонограмм; число таких комплексов измеряется единицами.

Имея в виду лишь очень общую характеристику больших звукотехнических комплексов, осуществленных в Москве и в Ленинграде, обратимся к рис. 63, дающему некоторое представление о диапазоне возможностей, предоставляемых постановщикам фильма для композиции канальных сигналов (числом до 9).

В левой части схемы изображены источники первичных сигналов. Основными источниками являются два комплекта для воспроизведения записи магнитных фонограмм на 35-мм перфорированной ленте. Каждый из комплектов содержит три аппарата; на ленте можно разместить до 9 дорожек записи. Лентопротяжные механизмы всех шести аппаратов приводятся в движение одним и тем же двигателем, чем обеспечиваются синхронные пуск, фазировка и остановка звуковоспроизводящих устройств и проекторов. В систему синхронно-синфазного привода входят еще два однодорожечных магнитофона. Таким образом, максимальное число одновременно и синхронно воспроизводимых сигналов составляет $6\times9+2=56$. Эти сигналы подаются на гнезда панели входной коммутации *ПВК*. Выходная сторона панели имеет такое же число гнезд, соединенных с входами пульта перезаписи *ПП*, так что любой из первичных сигналов можно подать на любой вход пульта, соединив шнуром соответствующие гнезда входной и выходной стороны. Соединение может быть непосредственным, однако чаще всего оно осуществляется через то или иное устройство, преобразующее форму сигнала. Правая часть схемы на рис. 63 отображает композицию требуемого числа канальных сигналов (четырех для широкоэкранного, шести для широкоформатного, девяти для панорамного фильма), осуществляемую с использованием так или иначе обработанных входных сигналов.

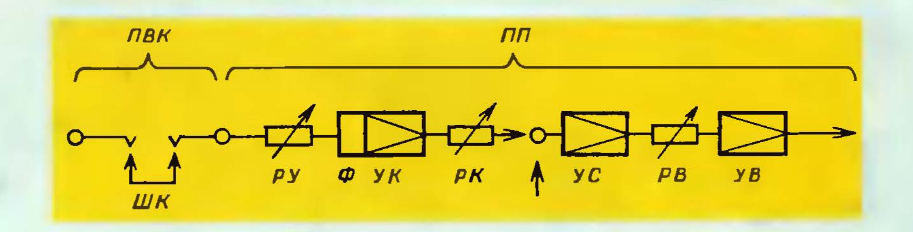


Рис. 64.

Процесс подготовки канального сигнала — одного из выходных сигналов пульта перезаписи — можно иллюстрировать на основе упрощенной схемы на рис. 64.

Шнуровая коммутация *ШК* дает возможность выполнения следующих операций обработки первичного сигнала:

1) преобразование спектра сигнала посредством обрезного фильтра высоких или низких частот либо же посредством режекторно-полосовых фильтров, выделяющих или подавляющих некоторую область частот;

2) введение искусственной реверберации, создаваемой с помощью реверберационной камеры, листового или пружинного ревербератора;

3) компрессию сигнала, т. е. сжатие его динамического диапазона;

4) распределение входного сигнала на несколько (до 5) гнезд выходного ряда.

После панели входной коммутации сигнал через установочный регулятор *РУ* подается на фильтр *Ф*, совмещенный с компенсирующим усилителем *УК*. Этот фильтр позволяет разнообразно изменять частотную характеристику передачи, имея по четыре ступени спада и подъема низких или высоких частот; можно также одновременно поднимать низкие и высокие частоты относительно средних. Уровень сигнала, прошедшего через фильтр и компенсирующий усилитель, задается канальиым регулятором *РК*. Откорректированные сигналы, подготовленные для какого-нибудь из выходных каналов пульта, поступают на смесительный усилитель *УС* и после регулятора *РВ* подаются на выходной усилитель *УВ*.

Моносигнал, получаемый от какого-либо из однодорожечных магнитофонов, может быть скоммутирован на вход панорамного микшера (см. § 6), выходные сигналы которого подаются на соответствующие каналы через смесительные усилители. Одноканальные линии могут быть использованы также для передачи дикторского текста.

Конечно, в звукотехническом комплексе перезаписи предусмотрены устройства сигнализации, связи, индикации осуществленных коммутаций и уровней, дистанционного управления и т.п. Есть также и возможность профилактических измерений. (Подробное описание структуры звукотехнического комплекса записи и перезаписи можно найти в работе [Л. 3], на основе которой сделана представленная здесь краткая сводка. Сведения относительно аппаратуры, применяемой в пультах перезаписи, имеются в книге М. З. Высоцкого [Л. 4].)

В настоящее время стереофоническое звуковое сопровождение имеют лишь широкоформатные фильмы. Широкоэкранные фильмы выпускаются только с фотографической монофонической звукозаписью, панорамные — время от времени снимаются для очень небольшого числа действующих установок круговой кинопанорамы. К вопросу о перспективах стереофонической техники в звуковом кино вернемся в следующей главе.

ГЛАВА ПЯТАЯ

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОВЫХ СИСТЕМ

18. ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА СТЕРЕОФОНИИ

Звуковые системы, используемые для передачи музыки и речи в кинематографии, в радиовещании и в грамзаписи, являются частными случаями в широком разнообразии систем передачи информации. Однако в этом особом случае оценка эффективности передачи посредством критериев, принятых в теории информации, нередко оказывается недостаточной, хотя, конечно, возможной.

Нельзя, например, сомневаться в том, что частотный и динамический диапазоны сигналов, передаваемых системой без заметных на слух искажений, являются мерами ее пропускной способности или, как теперь говорят, максимально возможной скорости передачи информации. Этими мерами пользовались задолго до появления теории информации, которая лишь отвела им надлежащее место в рамках гораздо более общей концепции. Заметим все же, что если иметь в виду только ту часть элементов сообщения, передача которой достаточна для сохранения его семантики, то при удовлетворении не слишком строгих требований эта часть информации независимо от качества системы передается всегда с одной и той же скоростью, а именно с той, с какой она выдается источником. Под семантической частью здесь подразумевается информация, содержащаяся в письменном тексте речевого сообщения или в нотной записи музыкального произведения.

С теоретико-информационной точки зрения многоканальные звуковые системы отличаются от многоканальных линий связи тем, что потоки информации, переносимые отдельными каналами, не разделяются на выходной стороне, направляясь по разным адресам, но, напротив, сливаются в один поток, компоненты которого органически связаны между собой. Смысл многоканальности заключается здесь не в том, чтобы увеличить пропускную способность системы пропорционально числу ее каналов. В тех случаях, когда стереофонию можно и должно признать переходом на более высокую ступень качества, ее каналы несут взаимно дополнительные (и в этом именно смысле не тождественные) информации, представленные соответствующим числом неизоморфных сигналов, излучаемых громкоговорителями в несовпадающих точках вторичного поля. Последнее условие имеет принципиальное значение: отбросив его, можно было бы смешивать неизоморфные электрические сигналы на входной стороне системы, как это и делается при монофонической передаче в процессе композиции одного-единственного канального сигнала. Принципиальное различие связано со спецификой бинаурального восприятия стохастических сигналов в звуковом поле нескольких независимых источников, когда два принимаемых ушами сигнала обнаруживают определенную степень декорреляции (см. § 11).

Многоканальная передача не всегда сопровождается тем повышением эстетического качества звучания, которое обусловлено обогащением информации при слиянии (в оговоренных ранее условиях) потоков, представленных неизоморфными сигналами. Так, например, эффекты раздельной локализации и следящего пеленга с наибольшим успехом создаются псевдостереофоническими средствами; но качество звучания остается при этом неизменным, если только каналы не различаются по своим электроакустическим показателям. Оно не изменяется и при одновременной передаче раз-

народных сигналов (например, речи и музыкального или шумового фона) по разным каналам.

Конечно, любое улучшение качества звучания связано с увеличением объема электроакустически передаваемой информации. Как показывают приведенные примеры, это утверждение не может быть обращено; прирост объема передаваемой информации еще не означает соответствующего повышения качества.

Б. Г. Белкин [Л. 1] предпринял попытку оценить с позиций теории информации тот вклад, который могла бы дать идеальная стереофония по сравнению с монофонической передачей. Под идеальной стереофонией при этом подразумевается система, с достаточной степенью сходства имитирующая непосредственное слуховое восприятие внешнего мира.

Говоря о слуховом приеме информации, Б. Г. Белкин различает три уровня ее обработки. Один из них (обозначенный символом X) соответствует диапазону возможностей первой сигнальной системы; сюда, в частности, относится различение сигналов по интенсивности и по направлению прихода. На следующем более высоком уровне (Y) в обработке информации ведущая роль принадлежит второй сигнальной системе, обеспечивающей различие сигналов по их форме и смыслу, т. е. по семантическим признакам. Наконец, на третьем наиболее высоком уровне (Z) семантически равноценные информационные потоки могут получить различную эстетическую оценку. При всей нерезкости границ между уровнями обработки принимаемой на слух информации можно все же утверждать, что различие между стерео- и монофонической передачей музыки осознается только на уровне Z (эстетическом), тогда как одновременное воспроизведение разнородных сигналов отражается на результатах обработки информации уже на уровне Y (семантическом). Что же касается различий в направлении прихода звука, то в меру разрешающей способности слуха они доступны восприятию даже и на низшем уровне X (рефлекторном).

Сделанный Б. Г. Белкиным ориентировочный расчет привел к следующим округленным оценкам: если принять за единицу информацию, доступную на уровне X, то информации, которые могут быть получены на более высоких уровнях, можно по порядку величины оценить числами 5 (на уровне Y) и 50 (на уровне Z). Соотношения 1 : 5 : 50 соответствуют, конечно, логарифмическим мерам количества информации.

На первый взгляд кажется, что эти цифры говорят о необходимости скорейшего перехода к стереофоническим звуковым системам во всех случаях, когда обработка информации затрагивает уровень Z. Нужно однако учесть тот факт, что распределение принимаемой информации по уровням ее обработки в разных случаях может оказаться очень различным. Возьмем в качестве первого примера восприятие музыки. В этом случае значением обработки информации на уровне X можно вообще пренебречь, а вкладам, соответствующим уровням Y и Z, приписать, не претендуя на точность, весовые множители 0,2 и 0,8. В этих условиях переход от моно- к стереофонии, значительно обогащающий информацию, доступную только на уровне Z, становится совершенно закономерным и может оправдать дополнительные затраты, связанные с увеличением числа каналов и с усложнением аппаратуры. Так именно и произошло в технике грамзаписи.

Второй пример относится к звуковому фильму. Предположим, что при усреднении по множеству фильмов полная информация поровну делится между изображением и звуком. Распределение звуковой половины информации по ценности результатов ее обработки на разных уровнях Б. Г. Белкин характеризует весовыми множителями 0,1 (на уровне X), 0,7 (на уров-

не Y) и 0,2 (на уровне Z). В конечном счете получаются следующие числа, определяющие относительное значение информаций, добытых на уровнях X, Y и Z (в долях от полной информации, полученной при просмотре звукового фильма):

на уровне X ....$0{,}5 \cdot 0{,}1 = 0{,}05$;
на уровне Y ....$0{,}5 \cdot 0{,}7 = 0{,}35$;
на уровне Z ....$0{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}10$.

Так как в данном случае переход к стереофонии практически на затрагивает результатов обработки на уровне Y, который здесь является основным и важнейшим, то не нужно удивляться тому, что преимущества стереофонической передачи не получили в кинематографии столь же безусловного признания, как в производстве граммофонных пластинок или магнитных лент с записью музыки.

Отметим, наконец, особенно существенное обстоятельство, ограничивающее интерес теоретико-информационной оценки звуковых систем рассматриваемого здесь класса. При оценке точности передачи с позицией теории информации идеальной нужно считать сквозную систему, обозначающую однозначную связь между посылаемыми и принимаемыми сообщениями, очевидно, что идеальной в этом смысле может быть только функционально детерминированная система, в частности звуковая система, гарантирующая высокую степень изоморфизма выходных и входных сигналов. Но, как об этом уже не раз говорилось, звуковые системы, оцениваемые в свете эстетических критериев, в подавляющем большинстве слушателей являются системами со свободным доступом.

Применительно к таким системам мера эффективности передачи должна устанавливаться на основе соображений, относящихся к оценке диапазона возможностей свободного доступа.

19. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В практике передачи и распространения информации нередко встречается ситуация, которую можно в более или менее общих чертах описать следующим образом.

Отправитель информации располагает дискретной совокупностью сообщений, принадлежащих некоторому так или иначе ограниченному множеству. Информацию, подлежащую передаче, отправитель формирует путем выбора из этой совокупности тех или иных сообщений, располагаемых им в определенном порядке (например, в пространстве или во времени). Эту обработку исходной (первичной) информации можно назвать организацией сообщений, смысл терминов «отправитель», «сообщение», «множество» лучше всего разъясняется при перечислении некоторых частных случаев.

Так, например, сообщения могут быть получены по телетайпу. Каждое из них содержит изложение какого-то факта, а множество характеризуется принадлежностью сообщений к типу газетной хроники. Отправителем является журналист, выбирающий отдельные тексты и располагающий их в определенной последовательности. В зависимости от принципов отбора и расположения сообщений у получателя информации — читателя газеты — создается то или иное представление о состоянии дел или о ходе событий, которых касается хроника. Тот факт, что это представление может быть сде-

лано совершенно превратным, свидетельствует о существенном влиянии организации сообщений на семантический аспект сформированной из них информации.

Другим примером того же типа может служить организация сообщений, представленных набором фотографий, в форме фотомонтажа — прием, широко используемый в искусстве плаката. Наконец, сюда же нужно отнести и создание хроникально-документальных фильмов. Здесь роли организации сообщений, представленных кадрами кинохроники, и ее влияние не только на семантический, но и на эстетический аспект информации, сформированной режиссером, становятся особенно интересными и значительными.

Обработкой информации является и аранжировка музыкальных произведений — переложение симфонической или вокально-симфонической музыки для исполнения с измененным составом инструментов или голосов. В качестве наиболее известного примера можно назвать переложение партитуры оперы или балета для фортепьяно (клавираусцуг). Сообщениями являются мелодические линии и последовательности созвучий, множество которых ограничено партитурой аранжируемого произведения. Выбор сообщений определяется техническими возможностями инструментов, для которых делается переложение. От тех же возможностей зависит и эстетическая оценка достигнутого результата: предполагая один и тот же уровень исполнительского мастерства, считаем, что чем шире технические возможности инструмента, тем более строгие требования можно предъявлять к звучанию аранжированной музыки.

Сложившаяся к настоящему времени технология передачи сигналов, представляющих натуральные звучания, побуждает рассматривать звукорежиссуру как организацию сообщений, которую иногда вполне уместно сравнивать с аранжировкой музыкальных произведений. Обращаясь к общей схеме звуковой системы со свободным доступом (рис. 7), можно сказать, что задача звукорежиссуры заключается в выборе эстетически оптимальной композиции N канальных сигналов из Q первичных неизоморфных сигналов. Выбор этих последних делается путем установки соответствующего числа микрофонов того или иного типа и использования иных источников сигнала в случае, если это необходимо. Осуществляемая звукорежиссером организация сообщений опирается на разнообразие имеющихся в его распоряжении технических средств для реализации операций тождественного и нетождественного преобразования сигналов (см. § 3). Количественная мера этого разнообразия несомненно явилась бы важной характеристикой эффективности системы со свободным доступом.

Имея фонограммы, представляющие Q первичных сигналов, звукорежиссер составляет из них N сумм, причем для каждого из слагаемых устанавливается некоторый определенный уровень (включая и $-\infty$, т. е. отсутствие соответствующего сигнала). Все или некоторые из сигналов могут быть подвергнуты операциям изменения тембра, задержки во времени или инверсии. При использовании искусственной реверберации обрабатываемый сигнал разделяется на два, приобретая партнера на выходе параллельно включенного реверберaтора. Сложение основного сигнала с реверберирующим приводит к результату, характеризующемуся не только уровнем суммарного сигнала, но и разностью уровней партнеров. Используя совмещенные микрофоны, звукорежиссер может еще в ходе первичной записи выбрать желаемые параметры, определяющие ширину и ориентацию соответствующего компонента звукового образа.

Имея в виду общий случай, положим, что каждый первичный сигнал может быть представлен одной из конечного числа модификаций, различ-

ного для разных сигналов. Общее число комбинаций, содержащих по одной модификации каждого из Q первичных сигналов, равно:

$$\nu = m_1 m_2 m_3 \cdot \cdot \cdot m_Q = \prod_{i=1}^{Q} m_i, \qquad (42)$$

где m_i — число различных модификаций i-го сигнала. Из этих ν комбинаций можно составить n выборок объема N (соответственно числу каналов), причем

$$n = \nu^N = \left(\prod_{i=1}^{Q} m_i \right)^N.$$

Таково общее число вариантов композиционного решения, предоставленных звукорежиссеру для выбора оптимального.

Требование аддитивности разнообразий по каждому виду различий побуждает выбрать логарифмическую меру оценки результирующего разнообразия имеющихся возможностей. Выражая эту оценку в двоичных единицах (битах), напишем:

$$S(Q,N) = \log_2 n = N \sum_{i=1}^{Q} \log_2 m_i = NQ\overline{\log_2 m}, \qquad (43)$$

где

$$\overline{\log_2 m} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^{Q} \log_2 m_i$$

есть среднее значение логарифма числа различимых модификаций в совокупности Q сигналов.

Следуя Эшби [Л. 19], будем называть величину S разнообразием. Оно линейно зависит как от числа каналов, так и от набора первичных сигналов, участвующих в композициях. Но если число каналов N является чисто технической характеристикой звуковой системы,то числа Q и $\overline{\log_2 m}$ выбираются звукорежиссером до некоторой степени произвольно в зависимости от сложности и протяженности задуманной звуковой картины. Однако свобода выбора ограничена составом аппаратуры, так как для реализации широкого разнообразия композиционных возможностей нужны не только пространственно разнесенные микрофоны, но и пульты с достаточно большим числом входов и выходов, ревербераторы, частотные фильтры и т. п. Выразительными примерами могут служить сложнейшие комплексы, используемые для записи и перезаписи при подготовке звукового сопровождения широкоформатных и панорамных фильмов (см. § 17). Функция $s = S/N = Q\,\overline{\log_2 m}$, характеризующая разнообразие, рассчитанное на один канал, определяясь в каждом отдельном случае профессиональным опытом звукорежиссера, в то же время зависит и от структуры системы на ее входной стороне. Стоит отметить, что квалифицированные звукорежиссеры нередко считают недостаточным число s в используемой ими аппаратуре и придают ему значение, не менее важное, чем числу каналов (конечно, если только $N \geqslant 2$).

20. ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗНООБРАЗИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Разнообразие, характеризующее предельные возможности звукорежиссуры, фактически всегда ограничено, т. е. не может быть использовано полностью. Ограничения обусловлены различными причинами, в частности теми, которые определяются вкусом и профессиональным опытом звукорежиссера и связаны с мало изученными, но несомненно существующими закономерностями, исключающими те или иные варианты набора канальных сигналов по мотивам эстетического характера. Такие ограничения в особенности существенны при передаче симфонических произведений и в известном смысле аналогичны правилам, которым подчинено сочинение музыки: значительная часть их облекается или может облекаться в форму запретов. Бывает, однако, что новые этапы в истории музыки начинаются с нарушения ранее действовавших запретов без добавления каких-либо новых. Под влиянием тех же факторов ограничения, связывающие звукорежиссера сегодня, с течением времени могут отпасть или стать менее строгими.

Отдельно нужно сказать об ограничениях, которые, будучи обусловлены спецификой частной конструктивной задачи, предопределяют принципы организации канальных сигналов. Характерным и часто встречающимся примером может служить управление локализацией кажущегося источника монофонического сигнала посредством панорамного микшера в многоканальной псевдостереофонической системе (§ 6, рис. 16, *а*). На рис. 16, *б* представлена характеристика затуханий в каналах микшера, причем на оси абсцисс отображена последовательность позиций ручки управления. Как видно из характеристики, сигнал может одновременно передаваться не более чем по двум каналам при условии, что максимальное затухание $D_{\text{макс}}$ достаточно для полного подавления сигнала. Если разность затуханий d при переходе от одной позиции к другой соответствует пороговому различию пеленгов, то общее число различимых позиций равно $(N-1)\cdot(D_{\text{макс}}/d)$; соответствующее разнообразие локализационных эффектов равно:

$$S(N)=\log_2\frac{D_{\text{макс}}}{d}+\log_2(N-1) \qquad (44)$$

и значительно меньше того, которое следует из (43) при $Q=1$ и $m=D_{\text{макс}}/d$.

Особенно существенное ограничение свободы выбора композиционных решений обусловлено структурой звуковой системы на ее выходной стороне.

Представленная на рис. 7 структура N-канальной системы предусматривает на стороне воспроизведения различные способы приготовления H излучаемых сигналов из N канальных. Если выбор какого-либо одного из возможных способов ничем не ограничен, то неопределенность, снятую осуществлением выбора, можно определить выражением

$$S(N,H)=NH\overline{\log_2\mu}, \qquad (45)$$

совпадающим по форме с (43); здесь

$$\overline{\log_2\mu}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\log_2\mu_i,$$

есть среднее значение логарифма числа модификаций μ_i в совокупности N передаваемых сигналов. Если схема вопроизведения выбрана, то разнообразие (45) сводится к возможности регулировать уровень (и, может быть, тембр) воспроизводимого звучания в той мере, в какой это допускается техническими средствами на выходной стороне системы. Нетрудно видеть, что

при монофоиической передаче ($H=N=1$) разнообразие (45) равно $\log_2 \mu$ и с самого начала полностью исчерпывается диапазонами указанной регулировки.

В технике многоканальной передачи предельное ограничение разнообразия (45) является условием возможности звукорежиссуры. Выполняя на входной стороне звуковой системы ту или иную композицию канальных сигналов, звукорежиссер должен считать равным нулю разнообразие схемных решений на ее выходной стороне; в противном случае его действия утрачивают определенность целевой установки. Поэтому структура выходной стороны многоканальной звуковой системы, в особенности размещение громкоговорителей относительно слушателей, определяет и тем самым ограничивает разнообразие композиционных решений.

Естественно, возникает вопрос: действительно ли раз и навсегда выбран какой-то один из многих вариантов воспроизведения канальных сигналов с сохранением лишь возможности регулировать уровень воспроизведения в соответствии с обстановкой?

Здесь нужно различать два случая. В одном из них, относящемся к воспроизведению грампластинок, магнитных записей и музыкальных радиопередач в домашних условиях, выходная сторона системы неконтролируема: слушатели, имеющие возможность дополнить свои установки теми или иными устройствами для обработки сигналов, могут широко использовать разнообразие (45). В частности, определенный интерес представляют квазистереофоническое воспроизведение моносигнала (рис. 19), стереоамбиофоническая система двухканальной передачи (рис. 10) и двухканальная имитация квадрафонии (рис. 15). Общим для всех этих трех типов систем, в которых $H > N$, является воспроизведение или реконструкция диффузного компонента звукового поля посредством неуверенно локализуемых или распределенных громкоговорителей. Можно предполагать, что только отсутствие промышленного производства компактных ревербераторов, доступных широкому кругу потребителей, препятствует распространению квазистереофонической техники и, в более общей форме, систем со свободным доступом на выходной стороне при $H > N$.

Второй случай охватывает звуковоспроизводящие устройства профессионального типа, в первую очередь в кинотеатрах, оборудованных для показа широкоформатных фильмов. Распределение канальных сигналов между кинотеатральными громкоговорителями здесь однозначно определено стандартом (ГОСТ 11 250-65). При показе широкоформатных фильмов дорожки 1—5 предназиачены для воспроизведения пятью заэкранными громкоговорителями, запись с дорожки 6 воспроизводится громкоговорителями канала эффектов (см. рис. 62). Микшерный пульт в театре допускает только совместную регулировку уровня в пяти основных каналах и отдельную в канале эффектов. Таким образом, разнообразие способов обработки воспроизводимых сигналов в достаточной мере ограничено для того, чтобы звукорежиссер мог считать его равным нулю.

Однако разнообразие (45) вовсе не лишено технического интереса, как это может показаться на первый взгляд. Разнообразия (43) и (45) в равной мере доступны при поисках новых решений, направленных на повышение эстетического качества звучания в системах с заданным числом каналов. Направление поисков определяется в первую очередь той или иной оценкой роли и значения различных компонентов стереофонического эффекта. Далее излагаются некоторые соображения, указывающие на возможность более эффективного использования каналов звукового сопровождения широкоформатного фильма.

21. ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ КАНАЛОВ ШИРОКОФОРМАТНОГО ФИЛЬМА

Возникнув в середине 50-х годов в качестве реальной и многообещающей технической перспективы, стереофония была с интересом встречена в различных областях звукотехники. Именно к этому времени относятся первые стереофонические грампластинки, первые опыты радиопередачи стереофонических музыкальных программ, наконец, системы стереофонического звукоусиления в больших залах. Стереофония была объявлена новой страницей в истории электроакустики, неотъемлемой частью того комплекса технических средств, которым обеспечивается так называемая «высокая верность» звуковоспроизведения.

С течением времени оценка стереофонии стала более сдержанной и осторожной. Ведь если в технике грамзаписи стереофония прочно вошла в практику, то в радиовещании она все еще носит характер эксперимента. В звуковом кино стереофония не сумела удержать своих позиций в производстве широкоэкранных фильмов; в широкоформатном фильме многоканальное звуковое сопровождение, хотя и технически осуществимое, по-видимому, еще нуждается в эффективном практическом освоении.

Тот факт, что стереофония не всюду оправдала возлагавшиеся на нее надежды, допускает различные толкования. В каждом отдельном случае действующие причины специфичны и складываются из ряда факторов. Но, как показывает история, жизнеспособное новшество, удовлетворяющее назревшую потребность, всегда пробивает себе дорогу через трудности, которые могут лишь задержать, но не остановить технический прогресс.

Так, например, в технике граммофонной записи двухканальная стереофония обязана своими успехами и признанием не только бесспорному обогащению звучания музыки, но и спросу со стороны очень большого числа квалифицированных любителей, не жалеющих затрат на аппаратуру высшего класса и располагающих постоянно пополняемой фонотекой. Уже было отмечено, что целесообразность перехода к стереофонической передаче музыки в данном случае находит свое объяснение в ведущей роли обработки информации на уровне Z (см. § 18). Но этот фактор, пусть необходимый, еще не является достаточным, как это следует, например, из того, что стереофоническое радиовещание там, где оно существует, составляет лишь малую долю общего объема музыкального вещания. Вероятно, это объясняется тем, что хотя контингент людей, слушающих радиомузыку, достаточно обширен, та его часть, которая способна оценить преимущества стереофонии, предпочитает пользоваться собственными ресурсами — магнитными фонограммами и пластинками, имея при этом полную свободу выбора программы и времени.

В звуковой кинематографии стереофония появилась одновременно и совместно с большим экраном. Это предопределило основную форму ее режиссерского использования в первых широкоэкранных и широкоформатных фильмах — игру эффектами раздельной и подвижной локализации или внезапных перебросов звука с одного края экрана на другой (эффект «пинг — понг»). Конечно, такого рода эффекты гарантируют уверенное опознание стереофонии, которая иначе могла бы остаться незамеченной многими слушателями. Однако утратив интерес новизны, эти эффекты не могли обеспечить многоканальной передаче звука убедительного преимущества по сравнению с одноканальной. Отсутствие решающего преимущества закономерно привело к постепенной ликвидации стереофонии в широко-

экранном кинематографе, где она требует отдельного фонда фильмокопий с четырьмя магнитными дорожками вместо одной фотографической. При переходе на 70-мм пленку необходимость отдельного фонда 35-мм фильмокопий не отпала бы даже и при одноканальном звуковом сопровождении (см. § 17). Поэтому в широкоформатном фильме стереофония сохраняет в своем распоряжении все шесть звуковых каналов и при эффективном их использовании имеет возможность доказать свое право на существование. Значение этой задачи особенно велико в связи с тем, что кадр широкого формата и соответственно большой площади способен нести информацию, качественно и количественно превосходящую то, что доступно обычному и широкоэкранному фильму. Звуковое сопровождение, составляющее драматургически единое целое с изображением, может и должно быть поднято до уровня тех требований, которые предъявляются к широкоформатному фильму.

При существующей форме использования шести звуковых каналов пять из них передают сигналы, воспроизводимые экранными громкоговорителями, и только один связан с распределенной и поэтому не локализуемой совокупностью зальных громкоговорителей. В таком использовании нашла отражение близорукая, хотя и широко распространенная оценка ресурсов стереофонии, понимаемой как способ добавить к передаваемому звучанию некоторую, пусть даже неполную информацию о размещении его источников. При этом звуковое сопровождение широкоформатного фильма расценивается как пятиканальная стереофония, дополненная изредка используемым (а то и вовсе не используемым) каналом шумовых эффектов, таких как гром, шум моторов невидимого самолета, отдаленная орудийная канонада и т. п. Распределение каналов по схеме 5+1 является одной из причин того, что разнообразие приемов звуковой драматургии, открываемое наличием шести каналов, используется далеко не в полную меру технических возможностей. Стереофония широкоформатного фильма нередко ограничивается лишь эффектами раздельной локализации или передачей движения источника; правда, квалифицированный звукооператор не пренебрегает там, где это возможно, и преимуществами стереофонического звучания музыки.

Нельзя не отметить, что как в монофоническом, так и в стереофоническом вариантах звуковое сопровождение кинофильмов в последнее время все чаще и чаще сводится просто к передаче речи действующих лиц, к музыкальному заполнению немых промежутков и к «подкладыванию под фонограмму» драматургически бездейственных и невыразительных шумов [Л. 7]. Пренебрежение звуковым компонентом фильма начинается со сценария и с его режиссерской разработки. Кажется, однако, что расширение ассортимента композиционных приемов звукорежиссуры, не ограничивающейся тривиальными локализационными эффектами, могло бы сделать многоканальную звуковую систему технической основой дальнейшего эстетического обогащения изобразительных и выразительных средств звукового кинематографа. Необходимыми условиями для этого являются, во-первых, творческое содружество сценариста, режиссера и звукооператора и, во-вторых, такое перераспределение звуковых каналов, при котором звукорежиссура не будет так сильно связана гегемонией фронтально поставленных громкоговорителей.

Рассмотрим некоторые наиболее интересные типы композиций канальных сигналов, встречаемые в различных случаях технической практики.

1. При передаче оркестровой музыки в процессе первичной записи синхронно и с минимально необходимой коррекцией записывается доста-

точно большое число первичных сигналов, представляющих важнейшие элементы сложной звуковой структуры. В ходе последующей перезаписи устанавливается оптимальное распределение первичных сигналов по каналам с выбором того или иного соотношения уровней складываемых сигналов, вида и меры частотной коррекции, эффектов искусственной реверберации и т. п. В частности, при этом конструируется и задуманная пространственная картина сложного звукового образа с раздельной (если это нужно) локализацией отдельных составляющих.

2. При наличии хотя бы одного канала, заканчивающегося распределенной системой зальных громкоговорителей, возникают широкие возможности имитации или организации важнейших архитектурно-акустических факторов — продолжительности реверберации, соотношения интенсивностей прямого и диффузного звука, временной структуры ранних отражений и т. д. Соотношение отраженной и прямой энергии определяет звуковые планы: увеличению доли диффузного звука соответствует переход от ближнего звукового плана к дальнему. Временная структура первых отражений играет определяющую роль в слуховой оценке объема помещения. Особенно важное значение имеют эти факторы при воспроизведении музыкальных звучаний. Различным архитектурно-акустическим обстановкам соответствуют различные композиции сигналов, подводимых к заэкранным и к зальным громкоговорителям с использованием линий задержки и устройств искусственной реверберации.

3. Для того чтобы слушатели правильно локализовали неподвижные и движущиеся источники звука, прибегают к псевдостереофоническим приемам, распределяя соответствующие сигналы по различным каналам или плавно перенося их из одного канала в другой с помощью панорамного микшера. Как уже отмечалось (§ 6), решающее преимущество псевдостереофонической техники определяется тем, что желаемые эффекты создаются при этом на всей площади мест (или по крайней мере на достаточно большой ее части), тогда как так называемая «истинная» стереофония ставит в невыгодное положение всех тех слушателей, для которых ближайший громкоговоритель принудительно становится единственным локализуемым источником слышимого звука.

Как нетрудно видеть, разнообразие композиционных решений в первых двух примерах определяется общей формулой (43) и, следовательно, пропорционально числу N каналов. В третьем же примере разнообразие локализаций нужно оценивать по формуле (44); оно растет пропорционально $\log_2 (N - 1)$, т. е. гораздо медленнее, чем в первых двух случаях. В частности, при переходе от трех основных каналов (как в широкоэкранном фильме со стереозвуком) к пяти (в широкоформатном кинематографе) разнообразие пеленгов в пределах ширины экрана возрастает всего лишь на одну двоичную единицу, как это следует из (44).

Сделанные оценки приводят к выводу, что увеличение числа каналов стереофонической системы может быть оправдано вовсе не повышением остроты локализации источников звука, но только обогащением разнообразия драматургических средств, используемых в художественном фильме, и возможностью передавать музыку с реалистической имитацией оптимальных акустических условий.

Представим себе, что должны решить задачу, относящуюся к переходу от широкоэкранного фильма с числом звуковых каналов $3+1=4$ к широкоформатному, позволяющему увеличить общее число каналов до шести. Как лучше всего использовать два новых канала? В свете изложенных здесь соображений можно уверенно утверждать, что добавление этих ка-

налов к тем трем, которые заканчиваются заэкранными громкоговорителями, не является оптимальным решением. Единственным доводом в пользу такого решения (к сожалению, уже осуществляющегося и закрепленного стандартом) является ссылка на увеличение числа различных локализаций; однако, даже оставляя в стороне указанную выше количественную оценку выигрыша, ссылка эта, как будет показано далее, несостоятельна. Было бы гораздо разумнее добавить еще два канала к тому единственному, который заканчивается распределенными громкоговорителями, что привело бы к схеме 3+3, в которой шесть звуковых каналов поровну разделены между заэкранными и зальными громкоговорителями. Эти последние можно представить как совокупность трех групп, размещенных на двух боковых стенах и на потолке или на задней стене зала.

Такое распределение не только не уменьшает, но даже и несколько увеличивает (по сравнению со схемой 5+1) разнообразие локализаций. Действительно, потеря небольшой части пеленгов в пределах ширины экрана с некоторым избытком компенсируется добавлением по меньшей мере трех внеэкранных локализаций, драматургически тем более ценных, что они не дублируются одновременно видимым изображением. Таким образом, результирующее изменение разнообразия пеленгов определяется по нижнему пределу цифрой

$$\Delta S_n = \log_2 3 - 1 = +0{,}6 \text{ дв. ед.}$$

Вместе с тем, подавая один и тот же сигнал на все три канала звуковых обстановок, можно получить нелокализуемое звучание, соответствующее диффузному компоненту поля. Еще более убедительная имитация важнейших архитектурно-акустических факторов получается при введении в каналы обстановки сигналов от параллельно работающих ревербераторов с взаимно некогерентными выходами или при передаче по разным каналам дискретных эхо-сигналов с различными временными структурами.

Вопрос «5+1 или 3+3», хотя и дискуссионный, не может быть решен в порядке дискуссии. Рассматриваемый в искусствоведческом аспекте, этот вопрос является не столько теоретическим, сколько экспериментальным; нисколько не умаляя значения предварительных оценок (особенно количественных), нельзя не согласиться с тем, что преимущества новых путей в искусстве доказываются достигнутыми на них результатами. Если схема 3+3 получит признание хотя бы в плане производственного эксперимента, то совместимость конкурирующих форм использования звуковых каналов при показе широкоформатных фильмов в кинотеатре может быть обеспечена сравнительно простыми техническими средствами.

А. Совмещенные микрофоны

Совмещенные микрофоны получили достаточно широкое распространение в технике стереофонической звукозаписи. Ознакомление с их характеристиками начнем с более подробного рассмотрения примера, приведенного в § 6, с XY-группы, составленной из двух одинаковых микрофонов с диаграммами направленности в форме кардиоид, акустические оси которых образуют прямой угол (рис. 65, *а*). Напряжения, развиваемые микрофонами при падении звука под углом φ к оси X-компонента, можно представить выражениями

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{U_0}{2}(1+\cos\varphi); \\ Y &= \frac{U_0}{2}(1+\sin\varphi,) \end{aligned}\right\} \qquad (46)$$

где U_0 — напряжение, развиваемое при осевом падении. Сигналы, получающиеся при синфазном и при противофазном сложении напряжений.

$$M = X + Y = U_0\left(1 + \frac{\cos\varphi + \sin\varphi}{1}\right) = U_0\left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right)\right];$$

$$S = X - Y = U_0\,\frac{\cos\varphi - \sin\varphi}{2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}\sin\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right).$$

Выбирая ось симметрии XY-группы в качестве полярной, положим $\theta = \pi/4 - \varphi$ и перепишем характеристики $M(\theta)$ и $S(\theta)$ в виде

$$\left.\begin{aligned} M(\theta) &= U_0\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\cos\theta\right); \\ S(\theta) &= \frac{U_0}{\sqrt{2}}\sin\theta. \end{aligned}\right\} \qquad (47)$$

Диаграммы, построенные по этим формулам, изображены на рис. 65, *б*. Соответствующие характеристики направленности не нормированы, так что их сравнение между собой и с характеристиками XY-группы (рис. 65, *а*) позволяет судить о соотношении чувствительностей в различных условиях использования. Отметим, в частности, отношение максимальных чувствительностей компонентов S и M:

$$q = \frac{S(\pi/2)}{M(0)} = \frac{1}{1+\sqrt{2}},$$

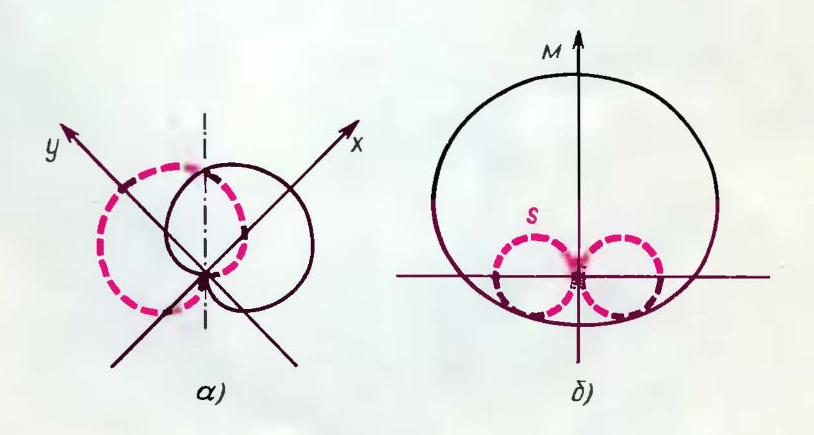


Рис. 65.

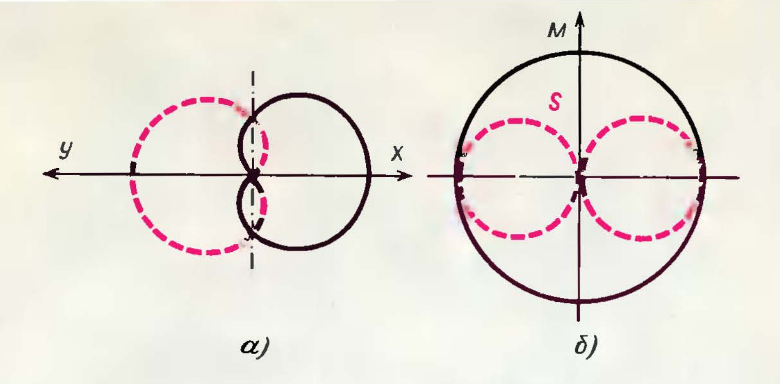


Рис. 66.

представляющее один из основных параметров совмещенного микрофона, тесно связанный с углом разворота осей XY-группы. Обращаясь к чисто иллюстративному примеру (рис. 66, *а*), рассмотрим, как изменяется q при возрастании угла α разворота осей кардиоид с 45 до 90°. (Углом разворота α называем угол поворота акустической оси компонентов XY-группы в ту или другую сторону от оси симметрии; угол раскрытия осей равен 2α.) В этом случае

$$X=\frac{U_0}{2}(1+\sin\theta); \qquad Y=\frac{U_0}{2}(1-\sin\theta)$$

и

$$M=X+Y=U_0; \quad S=X-Y=U_0\sin\theta.$$

Соответствующие диаграммы направленности имеют форму круга и восьмерки (рис. 66, *б*), причем $q=1$; таким образом возрастание угла α связано с увеличением q. Вместе с тем очевидно, что уменьшая α с 45° до 0, постепенно выводим S-компонент из игры, причем q—0.

Эта закономерность имеет более или менее общий характер. Рассмотрим, например, MS-группу, часто используемую в технологической практике, а именно комбинацию кардиоиды (M) и восьмерки (S). Характеристики направленности компонентов имеют:

$$M=\frac{1}{2}(1+\cos\theta); \quad S=q\sin\theta. \qquad (48)$$

При синфазном и противофазном сложении получаются X и Y-компоненты с характеристиками

$$\left.\begin{aligned} X &= M+S=\frac{1}{2}(1+\cos\theta+2q\sin\theta);\\ Y &= M-S=\frac{1}{2}(1+\cos\theta-2q\sin\theta).\end{aligned}\right\} \qquad (49)$$

Как нетрудно видеть, $X=Y=0$ при $\theta=\pi$, каково бы ни было q, поскольку здесь $M=S=0$. Главные максимумы, лежащие в направлении акустических осей компонентов XY-группы, определяются условием $\operatorname{tg}\theta=\pm 2q$; таким образом,

$$\alpha=\operatorname{arctg} 2q. \qquad (50)$$

Отсюда следует, что угол раскрытия осей возрастает с ростом параметра q. На рис. 67, *а* представлены диаграммы направленности X и Y (типа суперкардиоиды), построенные для частного случая $q=0{,}6$. В отличие от изображенных на рис. 67, *б* характеристик MS-группы эти характеристики не нормированы и позволяют судить о соотношениях чувствительности.

Наряду с углом раскрытия 2α существенный практический интерес представляет угол охвата 2β, ограничивающий ту область первичного поля, за пределы которой не должны выходить источники звука. Угол β определяется точкой пересечения (или касания) M и S-характеристик (рис. 67, *б*). Внутри угла 2β удовлетворяется условие $M\geqslant S$, согласно которому X и Y неотрицательны; поэтому при перемещении первичного источника в ту или другую сторону от оси симметрии ($\theta=0$) кажущийся источник будет смещаться в том же

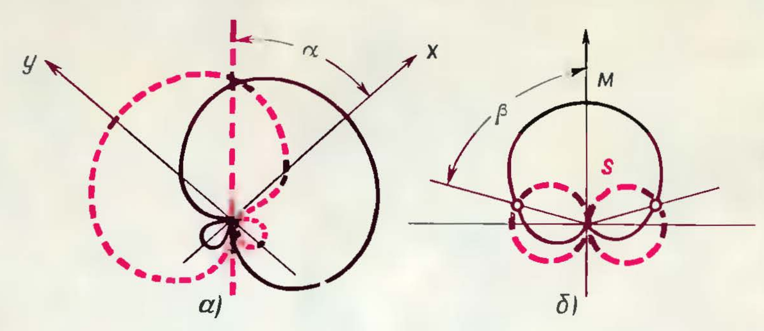


Рис. 67.

направлении до тех пор, пока $\theta < \beta$. В области же, где $\theta \geqslant \beta$, пеленг на звуковой образ смещается в направлении, обратном перемещению первичного источника.

На первый взгляд может показаться, что при увеличении угла α возрастает и β. Однако это не так. Условие $M = S$ или

$$1 + \cos\theta = 2q \sin\theta$$

приводит (после того, как выразим $\cos\theta$ и $\sin\theta$ через $\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}$) к решению $\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} = \pm\frac{1}{2q}$, откуда следует, что

$$\beta = 2 \operatorname{arctg}\frac{1}{2q}. \qquad (51)$$

Как теперь видим, угол охвата уменьшается при возрастании q (а следовательно, и угла разворота осей). На рис. 68 дано графическое изображение зависимости углов α и β от q.

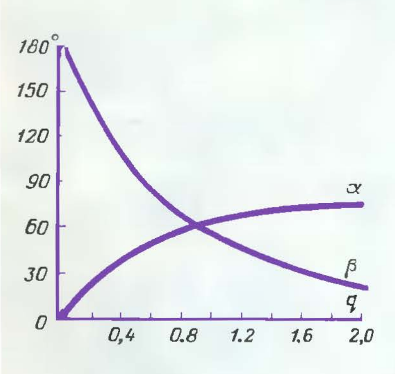


Рис. 68.

Заметим, что для изменения параметра q в любом желаемом направлении достаточно иметь возможность регулирования напряжений, получаемых от компонентов MS-группы, как это и делается посредством регуляторов ширины и направления (см. рис. 13).

Конечно, реальные характеристики направленности микрофонов никогда не имеют форм кардиоиды или восьмерки и притом зависят от частоты, в особенности вблизи от границ рабочего диапазона. Однако закономерность, связывающая углы α и β с параметром q, остается в силе и качественно правильно отображается кривыми на рис. 68.

Б. Искусственная реверберация

Архитектурная акустика как наука обязана своим существованием тому очень значительному влиянию, которое закрытое помещение оказывает на излучаемый в нем сигнал. Если размеры помещения достаточно велики сравнительно с длинами волн в области частот, занимаемой спектром сигнала, то это влияние можно представить как результат сложения излученного (первичного) сигнала с целым рядом постепенно запаздывающих его повторений, уровень которых в среднем убывает по мере возрастания запаздывания. В соответствии с этой моделью время реверберации — одна из важнейших акустических характеристик помещения — определяется двумя статистическими параметрами: средним временем свободного пробега волны, отделяющим одно отражение от другого, следующего за ним, и средней относительной убылью энергии сигнала при его отражении от ограничивающей поверхности. Затухающая последовательность запаздывающих повторений, моделирующая процесс реверберации в натурных условиях, может быть создана устройствами искусственной реверберации — ревербераторами, широко используемыми при обработке сигналов в звуковых системах со свободным доступом.

Влияние искусственной реверберации на первичный сигнал объективно обнаруживается при сравнении распределений мгновенных значений сигнальной функции на выходе и на входе ревербератора. Характер влияния нетрудно предугадать, если учесть, что запаздывающие повторения каждого из элементов сообщения, представленного сигналом, заполняют прежде всего промежутки между соседними элементами и тем самым уменьшают скважность или, в более общей формулировке, снижают вероятность малых значений сигнальной функции. Это значит, что распределение мгновенных значений выходного сигнала должно иметь меньший эксцесс, чем распределение на входе (см. § 1). Можно также сказать, что процесс реверберации в той или иной мере приближает распределение сигнала к нормальному.

В качестве меры эффекта Л. В. Шитов и Б. Г. Белкин предложили коэффициент нормализации распределения $h = 1 - \gamma_2/\gamma_1$,

где γ_1 и γ_2 — эксцессы распределений на входе и на выходе ревербератора. Как видно из формулы, коэффициент нормализации равен еднице, если выходной сигнал становится нормально распределенным ($\gamma_2 = 0$), и обращается в нуль, если распределение остается неизменным ($\gamma_2 = \gamma_1$).

Обычной формой использования ревербератора является его включение в канал, параллельный каналу первичного сигнала (см. рис. 19). При подмешивании реверберирующего сигнала к первичному можно выбрать то или иное отношение их средних мощностей

$$R = \overline{P}_{\text{р}}/\overline{P}_{\text{п}},$$

отображающее соотношение диффузной и прямой энергии в звуковом поле закрытого помещения. Коэффициент нормализации зависит от этого отношения и возрастает по мере роста R. Вместе с тем при прочих равных условиях коэффициент h зависит и от вида звучания, принимая значения тем более высокие, чем острее распределение первичного сигнала. Так, например, реверберация оказывает на речь более значительное влияние, чем на музыку, а при сравнении музыкальных произведений различного вида можно обнаружить, что наибольшему влиянию подвергаются произведения с четким ритмическим рисунком (эстрадная и джазовая музыка).

В качестве примера на рис. 69 приводятся зависимости h от R при обработке речевого сигнала (дикторская речь, сплошные линии) и эстрадной музыки (джаз-оркестр, пунктирные линии) с использованием пружинного ревербератора ПР-2. Параметром кривых является время искусственной реверберации с его частотной характеристикой; кривые 1, 2 и 3 соответствуют тем же кривым на рис. 70, где представлены эти характеристики [Л. 18].

Однако коэффициент нормализации нельзя считать подходящей мерой для оценки субъективной заметности эффекта искусственной реверберации. Как показывает опыт, этот эффект в некоторых случаях уверенно обнаруживается на слух даже и тогда, когда реверберирующий сигнал имеет значительно более низкий уровень, чем первичный; при этом коэффициент нормализации едва ли может быть надежно измерен.

На рис. 71 представлены данные, количественно характеризующие заметность добавления реверберирующего сигнала прн различных уровнях подмешивания

$$N = 10 \lg R$$

и различном времени (T) искусственной реверберации; данные относятся к речевому сиг-

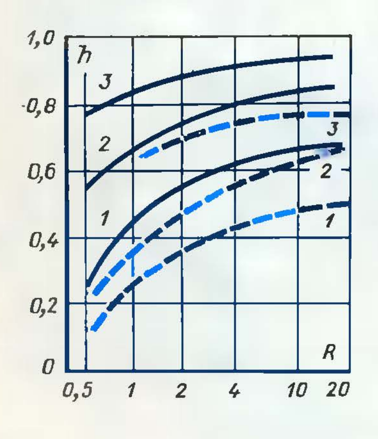


Рис. 69.

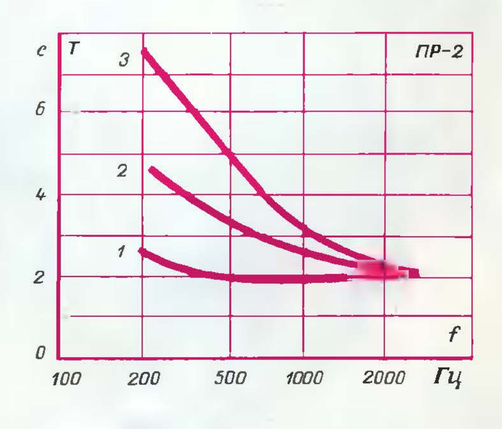


Рис. 70.

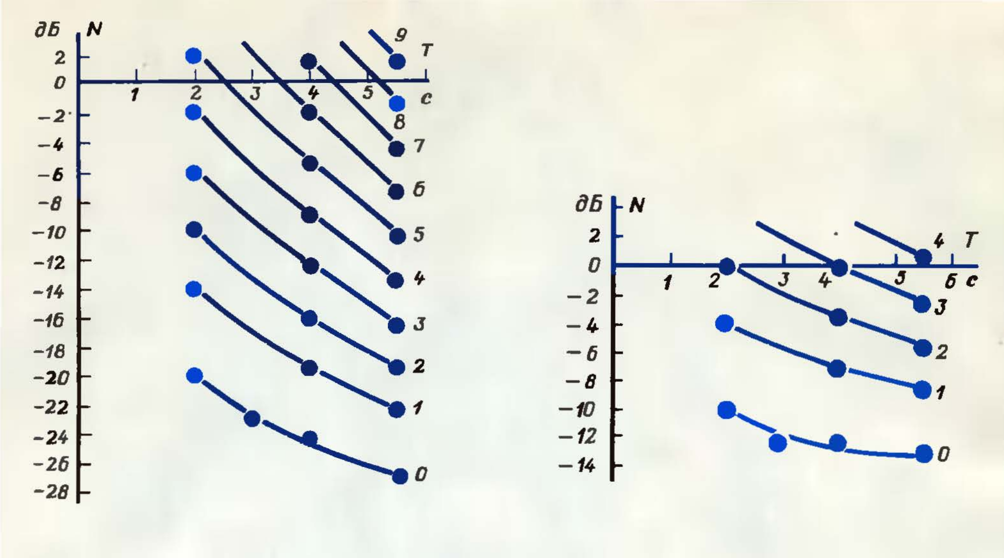


Рис. 71. Рис. 72.

налу [1]. Нижняя кривая представляет абсолютный порог заметности, соответствующий 50%-ной различимости минимально обработанного и необработанного сигналов при их сравнении по схеме *ABX*. Кривые, лежащие выше, отстоят друг от друга на величину пороговой единицы и, следовательно, изображают дискретную последовательность различительных ступеней; таким образом, цифры справа от кривых означают число пороговых единиц, характеризующих различимость обработанного сигнала относительно абсолютного порога при одном и том же времени искусственной реверберации (см. § 2). Точки, через которые проведены плавные кривые, указывают на экспериментально установленные значения. Аналогичным образом построены кривые на рис. 72, относящиеся к музыкальному сигналу (женский голос в сопровождении фортепьяно). Обработка сигналов осуществлялась студийным пружинным ревербератором ПР-3.

Сравнение кривых показывает, что абсолютный порог заметности эффекта искусственной реверберации в случае речевого сигнала лежит значительно ниже, а число различительных ступеней больше, чем в случае музыки. Заметим попутно, что на рис. 72 представлены данные, относящиеся к музыкальному сигналу, оказавшемуся наиболее чувствительным к искусственной реверберации; для оркестровой музыки абсолютный порог заметности еще выше (табл. 6). Различительные ступени имеют наибольшую величину (до 6 дБ) вблизи от абсолютного порога и сокращаются примерно до 3 дБ с повышением N и с возрастанием T.

Не нужно доказывать, что как увеличение времени искусственной реверберации при неизменном уровне подмешивания, так и повышение этого уровня при $T = \text{const}$ должны приводить к усилению того качества реверберирующего звучания, которое можно назвать гулкостью. Вопрос о том, эквивалентны ли субъективно ощущаемые эффекты изменения гулкости при разных видах ее регулирования, представляет практический интерес и требует экспериментального исследования.

Гулкость есть качество, допускающее количественное сравнение, когда при сопоставлении двух вариантов звучания один из них расценивается как более гулкий, чем другой. Как будет видно из последующего, этот факт может быть использован для установления условий одинаковой гулкости двух звучаний, различающихся по своим объективным характеристикам (если, конечно, такие условия существуют).

В опытах Ю. А. Индлина экспертам предъявлялись для сравнения по признаку гулкости два варианта одного и того же звучания, записанные с использованием искусственной реверберации. В варианте *A* время реверберации и уровень подмешивания имели фиксированные значения T_1 и N_1; в варианте *B* фиксировался только параметр T_2 (положим для определенности, что $T_2 > T_1$), тогда как параметр N_2, изменялся от уровней, лежащих намного ниже N_1, до значений, превышающих N_1. Испытания проводились с каждым из

[1] Приводимые здесь и далее экспериментальные данные почерпнуты из работы Ю. А. Индлина [Л. 10], посвященной исследованию границ эквивалентности двух видов управления реверберационными эффектами — изменения уровня подмешивания реверберирующего сигнала и изменения времени искусственной реверберации.

Таблица 6

Сигнал	Абсолютный порог заметности (дБ) при $T=2$ с	
	Одноканальная передача	Амбиофоническое воспроизведение
1. Речь (мужской голос)	—20	—20
2. Рахманинов. Мелодия (женский голос в сопровождении фортепьяно)	—10	—11,5
3. Равель. Концерт для фортепьяно с оркестром	— 2	—12
4. Штраус. Весенние голоса (симф. оркестр	— 2	—11,5
5. Бах. Токката и фуга (орган)	— 1	—11

экспертов индивидувльно; отрывки звучаний в последовательности $ABABAB$... предъявлялись до тех пор, пока при некотором определенном значении $N_2 = N_B$ слушатель не констатировал, что вариант B звучит более гулко, чем A. При достаточно большом числе экспертов значения N_B для данной пары вариантов распределяются по закону, близкому к нормальному; пример такого распределения представлен на рис. 73.

Нетрудно понять, что при очень малых значениях уровня N_2 ни один из экспертов не даст ожидаемого ответа; напротив при $N_2 > N_1$ этот ответ дают 100% слушателей. Гулкости вариантов A и B можно считать равными, когда ответы «A более гулко, чем B» и «B более гулко, чем A» становятся равновероятными, т. е. когда за каждый из них высказываются 50% слушателей.

Эксперименты, проведенные с речевым и музыкальным сигналами при различных комбинациях параметров N и T, привели к заключению, что два варианта расцениваются как одинаково гулкие при совпадении числа различительных ступеней (пороговых единиц). Таким образом, кривые порогов на рис. 71 и 72 определяют геометрическое место точек на плоскости NT, представляющих равногулкие звучания.

Выяснение условий эквивалентности двух способов регулирования гулкости позволяет уточнить требования, которые следует предъявлять к ревербераторам. Можно считать установленным, что основным средством управления должна быть регулировка уровня подмешиваемого сигнала, осуществляемая несравненно более простыми средствами, чем изменение времени искусственной реверберации, даже если не говорить о том, что такое изменение может сопровождаться изменением частотной характеристики T, именно ее подъемом в сторону низких частот тем более крутым, чем больше T в области 500—1 000 Гц (см. например, характеристики пружинного ревербератора, рис. 70).

Нужно иметь в виду, что равенство гулкостей двух сигналов еще не означает их изоморфизма. Как показал опыт, два равногулких звучания могут быть уверенно различимыми, если точки, представляющие их на соответствующей кривой равной гулкости, достаточно далеки друг от друга, т. е. если сигналы сильно различаются по времени искусственной реверберации. (Отсюда, в частности, следует, что два сигнала, порознь изоморфные с третьим, могут оказаться неизоморфными при сравнении их друг с другом. Равенство гулкостей является хотя и необходимым, но отнюдь не достаточным условием изоморфизма двух сигналов, записанных с использованием искусственной реверберации.) Поэтому несмотря на то, что изменение параметра N остается основным средством управления реверберационными эффектами, желательно сохранить еще и возможность выбора одного из двух фиксированных значений времени реверберации, скажем $T_1 = 2$ с $T_2 = 5{,}5$ с. Значение T_1 дает звукорежиссеру достаточно широкие возможности обработки сигнвлов при записи музыки; значение T_2 может понадобиться для специальных звуковых эффектов.

Приведенные выше экспериментальные данные относятся к одноканальной передаче суммы первичного и реверберирующего сигналов, складываемых в форме электрических колебаний еще до их воспроизведения громкоговорителем. Как уже неоднократно отмечалось, излучение реверберирующего сигнала распределенной системой громкоговорителей дает гораздо более убедительную имитацию натурных условий: за слушателем сохраняется возможность разделения нелокализованного диффузного звучания и первичного сигнала, воспроизводимого впереди стоящим громкоговорителем по независимому каналу. Такой способ создания эффектов искусственной реверберации называют амбиофоническим.

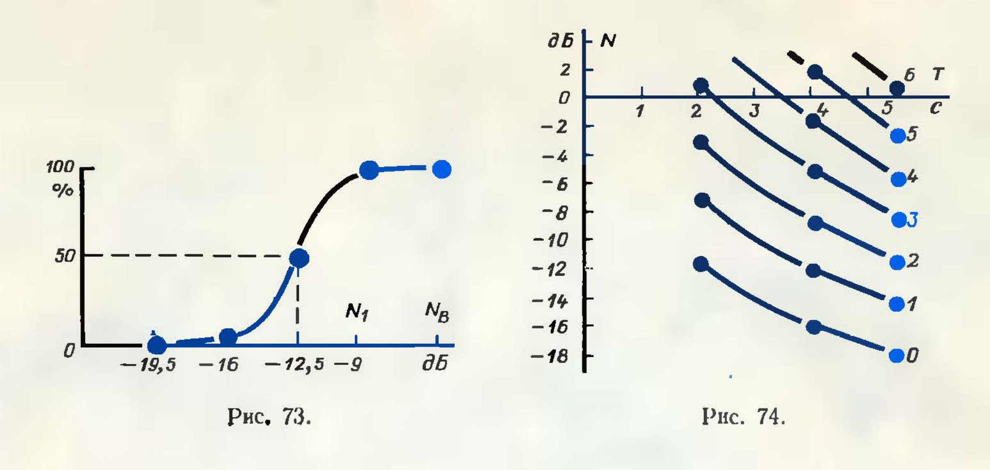


Рис. 73.

Рис. 74.

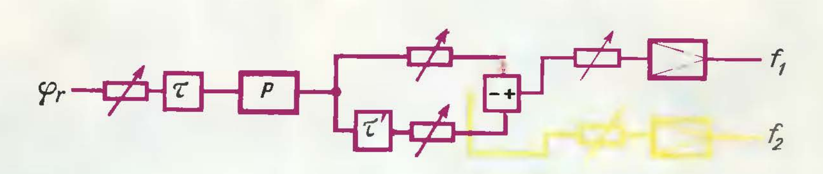


Рис. 75.

Опыты Ю. А. Индлина показали, что при амбиофоническом подмешивании абсолютный порог заметности реверберационной добавки в отличие от случая одноканальной передачи очень мало зависит от вида воспроизводимой музыки, сохраняя практически постоянную величину (табл. 6). Для речевого сигнала вид и положение кривых равной гулкости практически не зависят от того, где подмешивается реверберирующий сигнал — в электрическом канале или в воздухе. Иначе обстоит дело в случае музыки. Как видно из сравнения кривых равной гулкости (рис. 72 и 74), относящихся к одному и тому же сигналу, при амбиофоническом подмешивании (рис. 74) абсолютный порог несколько понижается, кривые становятся более пологими, интервал между ними сокращается, а число различительных ступеней соответственно увеличивается; отмечается также сокращение областей, в пределах которых равногулкие сигналы изоморфны. Все это дает основание считать, что амбиофонический вариант искусственной реверберации может дать звукорежиссеру более широкие и интересные возможности, чем обычное подмешивание в электрическом канале.

При двухканальной стереопередаче реверберирующие сигналы, подмешиваемые в каналы, должны быть взаимно некогерентными с тем, чтобы слушатели, располагающиеся вблизи от оси симметрии базы громкоговорителей, не локализовали источник реверберирующего звучания как точку в области середины базы (при неосевом положении слушателя соответствующая локализация осуществлялась бы в направлении на ближайший к нему громкоговоритель). Во избежание этого выходной сигнал ревербератора P сначала распределяется на два канала, в один из которых вводится задержка τ (рис. 75); после синфазного и противофазного сложения сигналы

$$f_1 = \varphi_r(t) + \varphi_r(t - \tau'),\quad f_2 = \varphi_r(t) - \varphi_r(t - \tau'),$$

подмешиваемые в основные каналы, можно считать некогерентными. Звуковой образ при этом расширяется и теряет локальную определенность (см. § 6). Нужно заметить, что синфазное и противофазное сложение нередко применяется даже и к сигналам от двух отдельных ревербераторов [Л. 29].

В амбиофоническом варианте искусственной реверберации необходимость питания громкоговорителей распределенной системы от нескольких некогерентных источников подтвердилась в ходе опытов электроакустического моделирования звуковых полей в закрытых помещениях (см. § 14). Возможно, однако, что при амбиофоническом воспроизведении в залах достаточно большого объема собственная их реверберация и наличие диффузной составляющей поля делают требование некогерентности менее строгим. Если при этом распределенная система громкоговорителей характеризуется высокой плотностью их размещения, то с условием некогерентности источников уже можно не считаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белкин Б. Г.** Заметки о стереофонии.—«Труды НИКФИ», 1970, вып. 56, с. 5—27.

2. **Борисенко А. В.** Новая акустическая стереофоническая система.— «Техника радиовещательного приема и акустики», 1969, вып. 3, с 66—71.

3. **Бриль Е. Г., Галкин Е. Б., Марсов С. В. Никульский Е. В.** Новый звукотехнический комплекс.— «Техника кино и телевидения» 1963, № 4, 5.

4. **Высоцкий М. З.** Большие экраны и стереофония. М., «Искусство», 1966.

5. **Гензель Г. С., Бабуркин В. Н., Богачева А. А., Федотов М. А.** Исследование особенностей слухового восприятия стереофонических передач.—«Труды учебных институтов связи», 1964, вып. 22, с. 107—118.

6. **Голдовский Е. М.** Информационная емкость фильмокопий при трансформации кинематографических систем,— «Техника кино и телевидения», 1971, № 1, с. 19—27.

7. **Закревский Ю.** Звуковой образ в фильме. М., «Искусство», 1970.

8. **Индлин Ю. А., Фурдуев В. В.** Регенеративная реверберация при звукоусилении в закрытых помещениях.— «Акустический журнал», 1968, 14, с. 221—226.

9. **Индлин Ю. А., Фурдуев В. В.** Различие формы канальных сигналов и восприятие стереозвучания,— «Техника кино и телевидения», 1971, № 3, с. 12—16.

10. **Индлин Ю. А.** Исследование взаимозаменяемости методов регулирования искусственной реверберации.— «Техника кино и телевидения», 1972.

11. **Кофман С. Э.** О возможности электроакустического подавления реверберации.— «Труды НИКФИ», 1970, вып. 56, с. 29—43.

12. **Кофман С. Э.** Реверберация в системе с электроакустической обратной связью. — «Акустический журнал», 1971, 17 (1), с. 61—66.

13. **Кофман С. Э.** О возможности подавления реверберации электроакустическими средствами.— «Акустический журнал», 1971, 17 (2), с. 254—257.

14. **Фурдуев В. В.** Интерференция и когерентность акустических сигналов.— «Акустический журнал», 1959, 5 (1), с. 111—116.

15. **Фурдуев В. В.** Предельное усиление звука в закрытых помещениях.— «Акустический журнал», 1965, 11 (3), с. 387—393.

16. **Фурдуев В. В.** Моделирование в архитектурной акустике.— «Техника кино и телевидения», 1966, № 10, с. 75—81.

17. **Фурдуев В. В.** Устойчивость стереофонических систем звукоусиления.— «Акустический журнал», 1967, 13 (4), с. 610—616.

18. **Шитов Л. В., Белкин Б. Г.** Статистические характеристики сигналов, представляющих натуральные звучания, и их применение при исследовании электроакустических систем. — «Труды НИКФИ», 1970, вып. 56, с. 77—174.

19. **Эшби У. Р.** Введение в кибернетику М., Изд-во иностр. лит.в 1959.

20. **Berkovitz R.** Four-channel stereo — the new surround sound.— «Electronics World», 1970, 83 (2), p. 38, 58.

21. **Bertram K.** Über den Umgang mit Stereo-Koinzidenz-Mikrophonen.— «Telefunken—Ztg.», 1965, 38 (3/4), p. 338—347.

22. **Boer K. de.** Stereophonic sound reproduction.— «Philips techn. Rev.», 1940, 5 (4), p. 107—114.

23. **Camras M.** Approach to recreating a sound field.— «J. Acoust. Soc. Am.», 1968, 43 (6), p. 1425—1431.

24. **Cremer L.** Allgemeine Bemerkungen zur Benutzung raumakustischer Modelle.— «Rundfunktechn. Mitt.», 1969, 13 (5), S. 196, 197.

25. **Damaske P., Mellert V.** Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher.— «Akustika», 1969/70, 22 (3), S. 153—162.

26. **Damaske P., Mellert V.** Zur richtungstreuen stereophonen Zweikanalübertragung. — «Akustika», 1970, 24 (4), S. 222—225.
27. **Glänzel H.** Betrachtungen über echte und pseudostereophonische Tonübertragung.— «Bild u. Ton», 1966, № 7, 8.
28. **Hefler D. A.** New quadraphonic system.— «Audio», 1970, 54 (7), p. 24, 56.
29. **Hoeg W., Wagner K.** Stereofonie—«Aufnahmetechnik». VEB Verlag Technik, Berlin, 1970.
30. **Keibs L.** Zur Frage über kompatiblen stereo-ambiofonischen Schallübertragung auf zwei Kanälen.— «Akustika», 1962, 12 (2), S. 118—124.
31. **Khruschev A. A.** Basic principles of the sound systems for multipurpose halls.— «J. S. M. P. T. E.», 1970, 79 (9), p. 772—777.
32. **Korn T.** Sur l'utilisation optimale de deux canaux pour la reproduction sonore.— «Akustika», 1967, 18 (1), p. 33—37.
33. **Kuhl W., Zosel J. M.** Untersuchungen zur Pseudostereophonie, Stereophonie mit Kugellautsprechern und «Raumklang» — Geräten.— «Akustika», 1956, 6 (AB—2), S. 474—481.
34. **Kühl W.** Üer eine Lautsprecheranordnung zur Wledergabe stereophoner Schallaufnahmen.— «Rundfnunktechn. Mitt.», 1959, 3 (4), S. 170, 171.
35. **Kürer R., Plenge G., Wilkens H.** Correct spatial sound perception rendered by a special 2-channel recording method. Preprint № 666 (H-3), AES 37-th Convention, 1969.
36. **Leakey D. M.** Some measurements on the effects of the interchannel intensity and time differences in the two channel sound system.— «J. Acoust. Soc. Am.», 1959, 31 (7), p. 977—986.
37. **Lochner J. P. A., Keet W. de V.** Stereophonic and quasistereophonic reproduction.— «J. Acoust. Soc. Am.», 1960, 32 (3), p. 393—401.
38. **Meyer E., Burgtorf W., Damaske P.** Eine Apparatur zur elektroakustischen Nachbildung von Schallfeldern.— «Akustika», 1965, 15 (AB-1), S. 339—344.
39. **Parkin P. H., Morgan K.** Assisted resonance in the Royal Festival Hall.— «J. Sound Vib.», 1965, 2 (1), p. 74—85.
40. **Parkin P. H., Morgan K.** Assisted resonance in the Royal Festival Hall, London, 1965—1969.— «J. Acoust. Soc. Am.», 48 (5), part 1, 1970, p. 1025—1035.
41. **Reichardt W., Haustein B.-G.** Zur Ursache des Effektes der «Im Kopf Lokalisation».— «Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik», 1968, 77 (5, 6), S. 183—189.
42. **Reichardt W., Schmidt W.** Die Wahrnehmbarkeit von Schallfeldparametern bei Darbietung von Musik.— «Akustika», 1967, 18 (5), S. 274—282.
43. **Reinchard W., Schmidt W.** Die horbaren Stufen des Raumeindruckes bei Musik.— «Akustika», 1966, 17 (3), S. 175—179.
44. **Schirmer W.** Zur Deutung der Übertragungsfehler bei kopfbezuglicher Stereophonie.— «Akustica», 1966, 17 (4), S. 228—233.
45. **Schiesser H.** Vierkanal Tontechnik.— «Fernseh- u. Kinotechnik», 1971, 25 (1), S. 17—20.
46. **Spandock F.** Die Vorausbestimmung der Akustik eines Raumes mit Hilfe von Modellversuchen. 5 CIA, Liege, 1965, 11, S. 313—343.

СОДЕРЖАНИЕ

ВАДИМ ВЛАДИМИРОВИЧ ФУРДУЕВ

СТЕРЕОФОНИЯ И МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЗВУКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Редактор издательства Т. В. Жукова
Обложка художннка А. А. Иванова
Технический редактор Н. А. Галанчева
Корректор И. А. Володяева

Сдано в набор 24/IV 1973 г. Подписано к печати 17/IX 1973 г.
Т-13968 Формат $70 \times 108^1/_{16}$ Бумага офсетная № 1 Усл. печ. л. 9,1
Уч.-изд. л. 8,78 Тираж 60 000 экз. Заказ 836 Цена 51 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Чеховский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Чехов Московской области

Цена 51 коп.

